

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 เมกะวัตต์
ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล

PERFORMANCE ANALYSIS OF 1.5 MW WIND TURBINE BLADES
USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

พินิจ สังข์ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

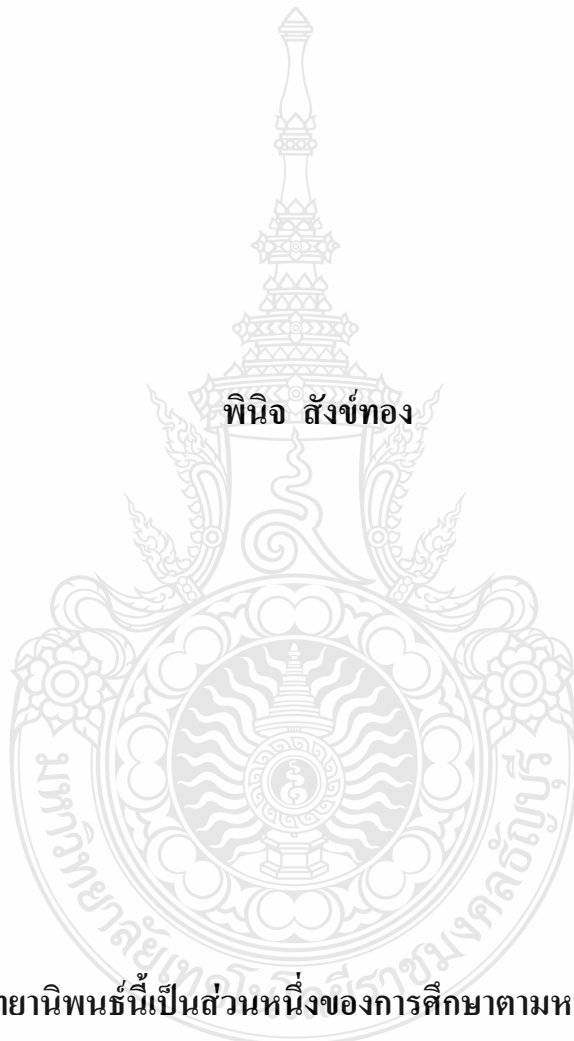
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกั้นลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 เมกะวัตต์
ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล



พินิจ สังข์ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 เมกะวัตต์
ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล

Performance Analysis of 1.5 MW Wind Turbine Blades Using
Computational Fluid Dynamics (CFD)

ชื่อ - นามสกุล

นายพินิจ สังข์ทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

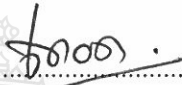
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์วิรัช ไรยนรินทร์, Ph.D.

ปีการศึกษา


2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์เทอดเกียรติ ลิมปิที่ปราการ, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์อำพล อาภาชนากร, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์สถาพร ทองวิก, ปร.ค.)


..... กรรมการ
(อาจารย์วิรัช ไรยนรินทร์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 7 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาด 1.5 เมกะวัตต์ ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล
ชื่อ - นามสกุล	นายพินิจ สังข์ทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วิรัช ไรยนรินทร์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมในปัจจุบันมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่ลมในประเทศไทย มีความเร็วเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 4-5 เมตรต่อวินาที ทำให้ต้องมีการศึกษาการทำงานของกังหันลมที่ติดตั้งใช้งานจริง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1.5 เมกะวัตต์ ที่ติดตั้งที่ อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช

การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ ในรอบ 1 ปี (Annual Energy Production, AEP) โดยการเก็บข้อมูลด้วยระบบควบคุมตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูล (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA) ระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึงเดือนมิถุนายน 2553 และนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาใช้ในการวิเคราะห์การทำงาน และเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างหากความยาวใบกังหันลมมีความแตกต่างกัน ด้วยการใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ผลที่ได้นำมาคำนวณหาพลังงานที่ผลิตได้ของใบกังหันแต่ละขนาด และทำการเปรียบเทียบค่า AEP และค่าประสิทธิภาพรวมของระบบ (Capacity Factor, CF)

ผลการศึกษาพบว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้าจริง จากขนาดใบกังหันลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 77 เมตร จากการบันทึกค่าได้พลังงาน 1,505,502 หน่วย คิดเป็นค่า CF เท่ากับ 11.46% และเมื่อทำการจำลองขนาดใบกังหันแต่ละขนาดด้วยโปรแกรม CFD ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 72 77 และ 82 เมตร พบว่าได้ค่า AEP 1,646,813 1,821,487 และ 1,974,163 หน่วย ตามลำดับ คิดเป็นค่า CF สูงสุดเมื่อยึดเส้นผ่านศูนย์กลางใบออกไป 5 เมตร แล้วมีค่าเท่ากับ 15.02% ซึ่งเหมาะต่อการใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้าในสถานที่ความเร็วลมต่ำ

คำสำคัญ: กังหันลมผลิตไฟฟ้า การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์ ใบกังหันลม

Thesis Title	Performance Analysis of 1.5 MW Wind Turbine Blades Using Computational Fluid Dynamics (CFD)
Name - Surname	Mr. Pinij Sangthong
Major Subject	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Mr. Wirachai Roynarin, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

Wind turbine is a widely machine use for electricity generating nowadays. However, wind speed in Thailand is low wind speed zone of about 4-5 m/s. Therefore, the study of wind turbine characteristics of site installation is required. This research aimed to analyze the efficiency of 1.5 MW wind machine which was installed at Hua Sai district, Nakorn Si Thammarat province.

The objective of this study was to analyze the annual yield of electricity generation using Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) from July 2009 to June 2010. The recorded data was used to study and compare different blade lengths using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The turbines performances were recorded to analyze the Annual Energy Production (AEP). The results of each computational in blade length were studied to compare the AEP and calculate the Capacity Factor, CF.

From the results of the original blade diameter of 77 meter showed the actual AEP values of 1,505,502 units with CF of 11.46%. The CFD technique was used to compute in turbine blade diameter of 72 77 and 82 meter. CFD results showed the AEP value of 1,646,813 1,821,487 and 1,974,163 units respectively to blade diameter. Therefore, the highest CF of 15.02 % occurred at 5 meter extended blade diameter compared to the original size, which was more appropriated to use wind machine in low wind speed zones.

Keywords: wind turbine, computational fluid dynamics, wind turbine blades

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.วิรัช โยชนรินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ดร.เทอดเกียรติ ลิ้มปิที่ปราการ ดร.สถาพร ทองวิค กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.อำพล อาภาธนากร ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติม พร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ที่ช่วยเหลือในด้านข้อมูลและสถานที่ และขอขอบคุณ บุคลากรศูนย์วิจัยประยุกต์ พลังงานน้ำ ลม และแสงอาทิตย์ ที่ให้ความร่วมมืออดทนในการดำเนินกิจกรรมวิจัยร่วมกัน จนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

พินิจ สังข์ทอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การเกิดลม	4
2.2 ลมสำคัญที่เกิดขึ้นในประเทศไทย	5
2.3 ตัวบ่งชี้ของสภาวะลมทางธรรมชาติ	8
2.4 การแปรค่าความเร็วลมตามความสูง	8
2.5 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามสภาวะเวลา	9
2.6 ความปั่นป่วนของลม	10
2.7 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม	11
2.8 พลังงานของลม	11
2.9 การเกิดแรงยกและแรงดูดบนแอร์ฟอยล์	15
2.10 ทฤษฎีการออกแบบกังหันลม	16
2.11 ประเภทของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	25
2.12 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่		
	2.13 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	28
	2.14 ตัวประกอบกำลังผลิต	31
	2.15 ช่วงการทำงานของกังหันลม	32
	2.16 ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย	33
	2.17 คลาสของกังหันลม	35
	2.18 ระบบควบคุมตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูล	35
	2.19 โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	37
	2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
3	วิธีดำเนินการวิจัย	41
	3.1 การเก็บบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูล	42
	3.2 การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้	44
	3.3 การวิเคราะห์กำลังงานจากใบกังหันลมด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	45
	3.4 การคำนวณหาลำดับงานที่ได้จากใบกังหันลม	48
	3.5 สถานที่ตั้งกังหันลมในการศึกษาวิจัย	51
	3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากใบกังหันลม	52
4	ผลการศึกษาวิจัย	54
	4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	54
	4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตจริง	55
	4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้	56
	4.4 ผลของแรงที่กระทำกับใบกังหันลมจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD	58
	4.5 ผลของกำลังงานที่คำนวณได้จากใบกังหันลมที่วิเคราะห์ด้วย CFD	60
	4.6 ผลการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานจากใบกังหันลม	62
5	สรุปผลการศึกษาวิจัย	64
	5.1 ผลการวิจัย	64
	5.2 ข้อเสนอแนะ	65
	รายการอ้างอิง	66

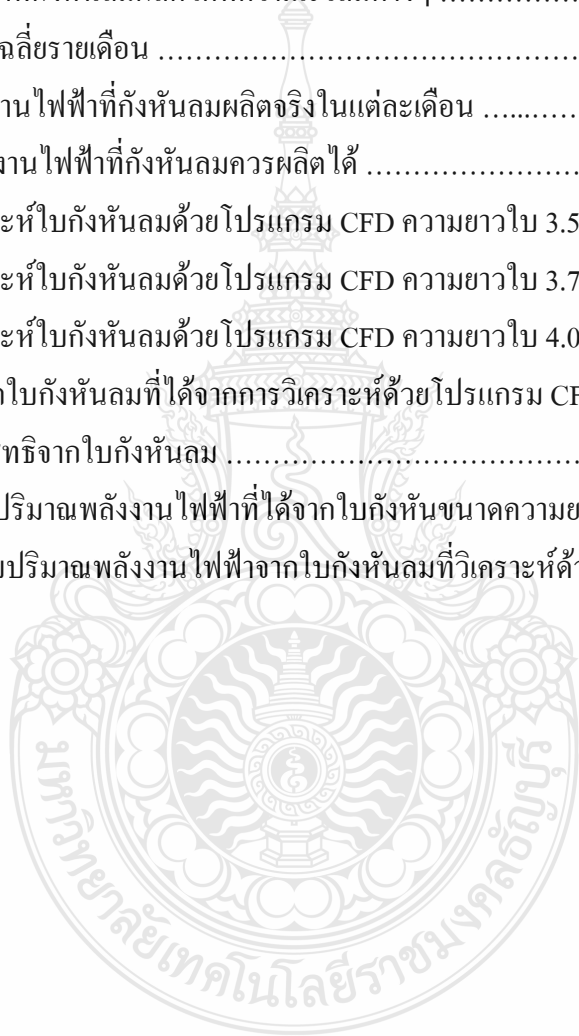
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่	
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ภายในกังหันลม	70
ภาคผนวก ข ข้อมูลการบันทึกค่าจากระบบ SCADA	73
ภาคผนวก ค การเดินเครื่องและผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม	77
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้	90
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD	92
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW	111
ภาคผนวก ช ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	114
ประวัติผู้เขียน	138



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งกั้นหลุมตามขนาดกำลังผลิต	26
2.2 คลาสของกั้นหลุม	35
3.1 จำนวนชั่วโมงการเกิดลมที่ความเร็วลมต่างๆ ในแต่ละเดือน	43
3.2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่กั้นหลุมผลิตได้ที่ความเร็วลมต่างๆ	44
4.1 ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน	54
4.2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กั้นหลุมผลิตจริงในแต่ละเดือน	55
4.3 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กั้นหลุมควรผลิตได้	57
4.4 ผลการวิเคราะห์ใบกั้นหลุมด้วยโปรแกรม CFD ความยาวใบ 3.5 m	58
4.5 ผลการวิเคราะห์ใบกั้นหลุมด้วยโปรแกรม CFD ความยาวใบ 3.75 m	59
4.6 ผลการวิเคราะห์ใบกั้นหลุมด้วยโปรแกรม CFD ความยาวใบ 4.0 m	59
4.7 กำลังงานจากใบกั้นหลุมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD	60
4.8 กำลังไฟฟ้าสุทธิจากใบกั้นหลุม	61
4.9 เปรียบเทียบปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากใบกั้นหลุมขนาดความยาวปกติ (37.5 m)	62
4.10 เปรียบเทียบปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากใบกั้นหลุมที่วิเคราะห์ด้วย CFD	63



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะลมบนพื้นผิวบรรยากาศโลก	4
2.2 ลมทะเล	5
2.3 ลมบก	5
2.4 ลมภูเขา	6
2.5 ลมหุบเขา	6
2.6 ลักษณะของต้นไม้ในบริเวณที่มีลมแรงพัดผ่านประจำ	8
2.7 การแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงจากพื้นผิวโลก	8
2.8 การแปรค่าของความเร็วลมตามสภาวะเวลา	9
2.9 การเกิดความปั่นป่วนของลมเมื่อผ่านสิ่งกีดขวาง	10
2.10 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม เมื่อพัดขึ้นเนินเขา	11
2.11 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม	13
2.12 แรยยกและแรงดูดบนหน้าตัดแอร์ฟอยล์	15
2.13 ตัวอย่างหน้าตัดแอร์ฟอยล์แบบต่างๆ	16
2.14 การวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีโมเมนต์	17
2.15 ประสิทธิภาพกังหันลมชนิดต่างๆ	21
2.16 การวิเคราะห์ตามทฤษฎี BET	21
2.17 แรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของใบกังหันลม	22
2.18 กังหันลมแกนนอน	26
2.19 กังหันลมแกนตั้ง	27
2.20 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว	28
2.21 ส่วนประกอบของกังหันลมขนาดใหญ่แกนนอน	28
2.22 ส่วนประกอบภายในห้องเครื่อง	29
2.23 เสาแบบโครงถัก	30
2.24 พู่กังหันลมเสาแบบโครงถัก	30
2.25 โครงสร้างภายในเสากังหันลมแบบท่อเรียว	31
2.26 ตัวอย่างช่วงการทำงานของกังหันลม	32
2.27 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมที่ระดับความสูง 90 เมตร	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.28 ระบบ SCADA ของกังหันลม	36
2.29 ลักษณะขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ใบกังหันในอุโมงค์ลม	39
2.30 การใช้ CFD วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันของบริษัทผู้ผลิตใบกังหันลม	39
2.31 การวิเคราะห์ใบกังหันด้วยโปรแกรม CFDDesign V 8.0	40
3.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW	42
3.2 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วลมและทิศทางลมบนห้องเครื่อง	42
3.3 สมรรถนะกำลัง (Power curve) ตามการทำงานจริงของกังหันลม	45
3.4 หน้าตัดของแอร์ฟอยล์ NACA 64 ₁ -412	46
3.5 รูปแบบใบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์	46
3.6 ลักษณะของ Mesh ในการวิเคราะห์	46
3.7 การวิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันด้วยโปรแกรม CFD	47
3.8 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันความยาว 3.5 m	47
3.9 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต	48
3.10 แรงที่เกิดกับใบกังหันลม	49
3.11 ทิศทางแนวแกนของแรงที่กระทำกับใบกังหัน	49
3.12 แผนที่ตั้งโครงการ	51
3.13 สถานที่ติดตั้งกังหันลม	52
3.14 แผนผังลำดับขั้นตอนการศึกษาวิจัย	53
4.1 เปอร์เซนต์ความถี่การกระจายตัวของความเร็วลม	55
4.2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตจริงในแต่ละเดือน	56
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้กับความเร็วลมเฉลี่ย	56
4.4 เปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่กังหันลมผลิตจริงกับปริมาณพลังงานที่ควรผลิตได้	57
4.5 สมรรถนะกำลังตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบที่วิเคราะห์ด้วย CFD	61

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	แฟกเตอร์ความสูญเสียในแนวแกน
a'	แฟกเตอร์ความสูญเสียในแนวการหมุน
A	พื้นที่กวาดใบกังหันลม
A_0	พื้นที่หน้าตัดอากาศก่อนผ่านใบกังหันลม
A_1	พื้นที่หน้าตัดอากาศหลังผ่านใบกังหันลม
A_b	พื้นที่ระนาบแพนอากาศ
B	จำนวนใบกังหันลม
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_D	สัมประสิทธิ์แรงจุด
C_P	สัมประสิทธิ์กำลัง
D	แรงจุด
E_w	พลังงานจลน์ของลม
F_T	แรงในแนวแกน
F_Q	แรงในแนวรัศมี
F_X	แรงที่กระทำกับใบกังหันในแนวแกน X
F_Y	แรงที่กระทำกับใบกังหันในแนวแกน Y
F_Z	แรงที่กระทำกับใบกังหันในแนวแกน Z
L	แรงยก
\dot{m}	อัตราการไหลของมวลอากาศ
P	กำลังงานที่ได้จากใบกังหันลม
P_{net}	กำลังไฟฟ้าสุทธิ
P_T	กำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้
P_w	กำลังงานของลม
Q	ทอร์กในแนวรัศมี
r	ระยะรัศมีจากแกนเพลลาถึงจุดที่วิเคราะห์
R	รัศมีใบกังหัน
T_a	แรงผลึกที่เกิดกับใบกังหันในแนวแกน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

u	ความเร็วลมที่ใบกังหัน
U_{rel}	ความเร็วลมสัมพัทธ์
V_a	ปริมาตรของอากาศ
V_0	ความเร็วลมอิสระ
W_T	พลังงานที่กังหันลมสกัดได้
η_e	ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
η_m	ประสิทธิภาพของเกียร์ทดรอบ
Ω	ความเร็วเชิงมุม
ρ	ความหนาแน่นอากาศ
λ	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ
ϕ	มุมความเร็วลมสัมพัทธ์
α	มุมปะทะ
θ	มุมพิทช์
AEP	Annual Energy Production
CAD	Computer Aided Design
CF	Capacity Factor
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
IEC	International Electrotechnical Commission
KAMM	Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
TSR	Tip Speed Ratio
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานมีปริมาณสูงขึ้นทุกปีเนื่องมาจากการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและสังคม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมและจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ซึ่งส่งผลให้ความต้องการพลังงานเพื่อนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะเดียวกัน วัตถุประสงค์หรือเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ผลิตพลังงานกลับลดน้อยลงทุกวัน โดยเฉพาะเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ซึ่งสวนทางกับราคาที่มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ปัญหาหลักอย่างหนึ่งทางด้านพลังงานของประเทศไทย เกิดจากการที่ประเทศไม่มีความสามารถในการพึ่งพาตนเองทางด้านพลังงาน ทำให้ต้องสูญเสียเงินตราจากการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก วิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานนับเป็นปัญหาสำคัญระดับชาติที่ต้องดำเนินการแก้ไขอย่างเร่งด่วน รวมไปถึงการวางแผนอย่างรอบคอบในระยะยาว และเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานของประเทศ พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานพื้นฐานอย่างหนึ่งที่เป็นต่อการดำรงชีพ แหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยคือ ก๊าซธรรมชาติ และ ถ่านหิน ซึ่งพลังงานเหล่านี้ถือเป็นพลังงานสิ้นเปลืองเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป นอกจากนี้พลังงานที่มาจากฟอสซิล ยังก่อให้เกิดมลภาวะ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม ทั้งยังเป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน

พลังงานหมุนเวียนจากธรรมชาติจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยในการแก้ปัญหาวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ที่ควรสนับสนุนส่งเสริมและพัฒนาอย่างจริงจัง พลังงานลม เป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มีการพัฒนาให้มีขีดความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้ในระดับเมกะวัตต์ มีการติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าในหลายประเทศ ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ต้องศึกษาวิเคราะห์ความเหมาะสม ปัจจุบันกังหันลมขนาดใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ขนาดของใบจึงเหมาะสมกับความเร็วลมเฉลี่ยที่สูงกว่าประเทศไทย หากนำมาใช้กับความเร็วมลที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมอาจไม่ดีเท่าที่ควร การหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพกังหันลมด้วยการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ อาจเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ทำให้กังหันลมมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม จากผลของการเพิ่มและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกังหันลม

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1.5 MW

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 ความเร็วลมเฉลี่ยของอำเภอหัวไทรอยู่ในช่วงระหว่าง 4-6 m/s

1.3.2 ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม สอดคล้องกับความเร็วลมเฉลี่ย

1.3.3 ขนาดความยาวใบ มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการทำงานจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 77 m ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช

1.4.2 ช่วงเวลาในการศึกษาเก็บข้อมูลลมและการผลิตไฟฟ้า อยู่ในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึงเดือนมิถุนายน 2553

1.4.3 ใช้การจำลองรูปร่างและขนาดความยาวใบกังหันลม โดยย่อส่วนให้มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด คือ 3.5 m, 3.75 m และ 4 m โดยให้มีรูปร่าง Air Foil แบบเดียวกันทั้งหมด ไม่มีการบิด และมีความยาวคอर्डคงที่ตลอดความยาวใบ

1.4.4 ใช้โปรแกรม CFDesign V.8 วิเคราะห์ใบกังหันที่ทำการจำลอง ในช่วงความเร็วลมตั้งแต่ 3 m/s ถึง 14 m/s โดยที่ความเร็วลมเดียวกันใบกังหันมีมุมพิทช์คงที่เท่ากัน

1.4.5 กำหนดให้ไม่มีการคองของอากาศ ไม่คิดค่าการสูญเสียในแนวรัศมี

1.4.6 การวิเคราะห์ด้วย CFD กำหนดให้ความเร็วลมคงที่ ไม่มีความปั่นป่วนของลม และให้เป็นของไหลชนิดอัดตัวไม่ได้

1.4.7 เปรียบเทียบค่า AEP ระหว่างใบจริงกับใบจำลอง ที่ขนาดความยาวใบปกติ (37.5 m) เมื่อมีค่าต่างกันไม่เกิน $\pm 3\%$ สามารถยอมรับได้

1.4.8 ให้ประสิทธิภาพทางกลของเกียร์ตรอบ และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีค่าคงที่เท่ากับ 0.95 ที่ทุกความเร็วลม

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 เก็บรวบรวมข้อมูลลมและการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม

1.5.2 ทำการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตจริง และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้ เมื่อสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

1.5.3 จำลองขนาดใบกังหันลม และทำการวิเคราะห์หาแรงที่กระทำกับใบกังหันลมด้วยโปรแกรม CFD

1.5.4 กำหนดหาค่า AEP ที่ได้จากใบจริงและใบจำลอง เพื่อเปรียบค่า AEP ในการผลิตไฟฟ้าจากความยาวใบขนาดปกติ

1.5.5 กำหนดเปรียบเทียบค่า AEP จากใบจำลองที่วิเคราะห์ด้วย CFD

1.5.6 สรุปผลการศึกษา

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ทราบศักยภาพพลังงานลม ในการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดใหญ่ ที่อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช

1.6.2 ได้ทราบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1.5 MW

1.6.3 เป็นแนวทางสำหรับการพิจารณาขนาดใบกังหันลม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า ให้เหมาะสมกับความเร็วลม

1.6.4 เป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมขนาดใหญ่ สำหรับความเร็วลมในประเทศ

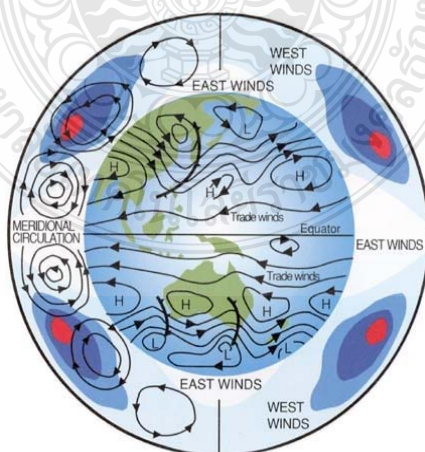
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดลม

พลังงานหมุนเวียนทุกรูปแบบ ยกเว้นพลังงานน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Energy) และพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal Energy) เกิดขึ้นจากดวงอาทิตย์ ดวงอาทิตย์แผ่รังสีมายังพื้นโลกเป็นปริมาณ 174,423,000,000,000 kWh ในปริมาณพลังงานที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ มีเพียงร้อยละ 1-2 ของปริมาณพลังงานเหล่านี้ ที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานลม ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นสิ่งที่ขับเคลื่อนให้อากาศหมุนเวียน บริเวณเส้นศูนย์สูตรของโลกเป็นพื้นที่ที่ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์มากที่สุด อากาศที่ร้อนมีน้ำหนักเบากว่าอากาศที่เย็นจะลอยตัวสูงขึ้นสู่ท้องฟ้าจนกระทั่งถึงระยะความสูงประมาณ 10 km ต่อจากนั้นจะกระจายไปยังทางทิศเหนือและทางทิศใต้

พื้นโลกในตำแหน่งต่างๆ ได้รับความร้อนแสงอาทิตย์ในปริมาณที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น เวลา (เวลากลางวันและเวลากลางคืนจะได้รับปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ต่างกัน) ความไม่สม่ำเสมอของผิวโลก ความแตกต่างของพื้นผิว (เช่น ผืนดิน ผืนทราย ผืนป่าและผืนน้ำ) การดูดกลืนและสะท้อนพลังงานความร้อนในอัตราที่ไม่เท่ากัน โลกหมุนรอบตัวเองและหมุนรอบดวงอาทิตย์ ก่อเกิดปรากฏการณ์คว่ำกู่ นั่นคือบรรยากาศของโลกร้อนไม่เท่ากัน อากาศร้อนลอยตัวห่างจากผิวโลก ส่งผลให้ความดันบรรยากาศที่ผิวโลกลดลง อากาศที่เย็นกว่าถูกผลักให้ไหลมาแทนที่ ผลก็คือ การก่อเกิดลม [1]



ภาพที่ 2.1 ลักษณะลมบนพื้นผิวบรรยากาศโลก [1]

2.2 ลมสำคัญที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

ลมหลักที่พัดผ่านประเทศไทยประกอบไปด้วย ลมประจำถิ่น และ ลมมรสุม ลมประจำถิ่นเป็นลมพัดเฉพาะที่ที่เกิดจากความแตกต่างของความกดอากาศในบริเวณใกล้เคียงของภูมิภาคในท้องถิ่นนั้นๆ เช่น พื้นที่ที่เป็นทะเล หรือ พื้นที่ที่เป็นภูเขาหรือหุบเขา เป็นต้น ลมประจำถิ่นจะมีอิทธิพลต่อสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ในบริเวณนั้นๆ

2.2.1 ลมประจำถิ่น

1) ลมบกและลมทะเล เกิดจากความร้อนซึ่งแตกต่างกันระหว่างการรับและคายความร้อนระหว่างบริเวณทะเลและพื้นดิน คือ เมื่อได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน พื้นดินจะมีความสามารถในการรับความร้อนได้เร็วกว่าพื้นน้ำ อากาศเหนือพื้นดินจึงลอยตัวสูงขึ้น อากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าก็จะเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดลมที่พัดในทิศทางจากทะเลไปยังพื้นดิน เรียกลมประเภทนี้ว่าลมทะเล (Sea Breeze) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ส่วนลมบก (Land Breeze) จะเกิดในเวลากลางคืน คือ พื้นดินคายความร้อนได้เร็วกว่า จึงทำให้อุณหภูมิเหนือพื้นดินต่ำกว่าพื้นน้ำ อากาศเหนือพื้นน้ำจึงลอยตัวสูงขึ้น อากาศที่เย็นกว่าจากพื้นดินก็ไหลเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดลมในทิศทางที่พัดจากบกไปสู่ทะเล ดังแสดงในภาพที่ 2.3

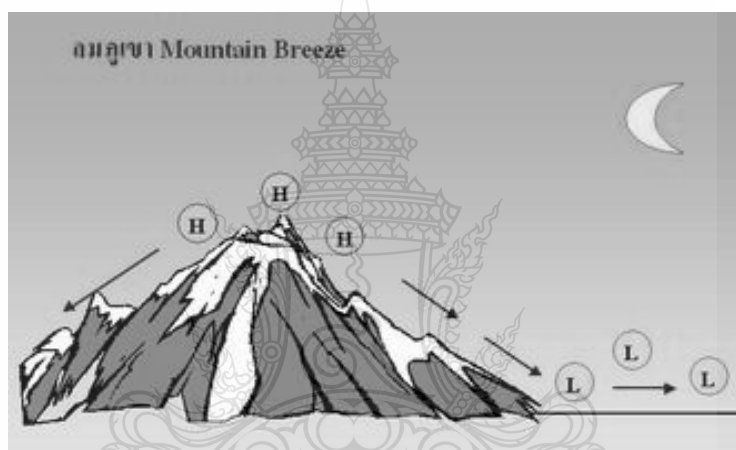


ภาพที่ 2.2 ลมทะเล [1]

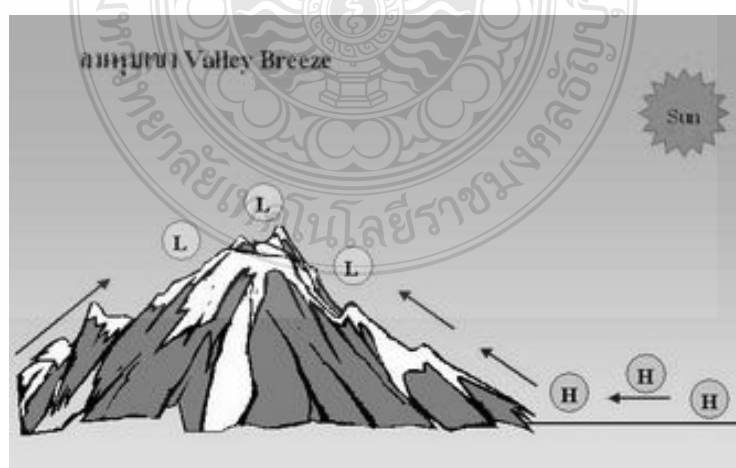


ภาพที่ 2.3 ลมบก [1]

2) ลมภูเขาและลมหุบเขา การเกิดลมภูเขาและลมหุบเขา สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับการเกิดลมบกลมทะเล กล่าวคือ เกิดจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิระหว่างยอดเขาและหุบเขา เพราะในเวลากลางวัน ตามบริเวณภูเขาที่ระดับสูงมีอากาศเย็นกว่าตามบริเวณที่ต่ำ จึงเกิดลมที่พัดจากภูเขาลงไปสู่หุบเขา เรียกลมนี้ว่า ลมภูเขา (Mountain Wind or Mountain Breeze) ภาพที่ 2.4 แสดงการเกิดลมภูเขา ขณะที่ตอนกลางวันซึ่งบริเวณยอดเขาและลาดเขาจะได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์มากกว่า ทำให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นและอากาศที่เย็นกว่าบริเวณหุบเขาก็จะพัดเข้ามาแทนที่ เรียกลมประเภทนี้ว่า ลมหุบเขา (Valley Breeze) ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดของลมหุบเขา โดยทั่วไปลมภูเขา (พัดลง) จะมีความแรงกว่าลมหุบเขา (พัดขึ้น)



ภาพที่ 2.4 ลมภูเขา [1]



ภาพที่ 2.5 ลมหุบเขา [1]

3) ลมตะเภา เป็นลมท้องถิ่นประจำประเทศไทยที่พัดมาจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือ คือพัดจากอ่าวไทยเข้าสู่ภาคกลางตอนล่าง พัดในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนทิศจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือไปเป็นตะวันตกเฉียงใต้ การพัดของลมตะเภาจะนำความชื้นมาสู่ภาคกลางตอนล่าง ในสมัยโบราณ ลมนี้จะช่วยพัดเรือสำเภาที่เข้ามาค้าขายให้แล่นไปตามแม่น้ำเจ้าพระยา

4) ลมว่าว เป็นลมที่พัดจากทิศเหนือไปยังทิศใต้ เกิดขึ้นในช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนพฤศจิกายน ลมว่าเป็นลมเย็นที่พัดตามแม่น้ำเจ้าพระยา และพัดในช่วงที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะเปลี่ยนเป็นลมตะวันออกเฉียงเหนือ หรืออาจจะเรียกว่าลมข้าวเบา เพราะพัดในช่วงที่ข้าวเบากำลังออกรวง

2.2.2 ลมมรสุม

ประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมสองชนิด คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นลมประจำฤดู กล่าวคือ ลมมรสุมทั้ง 2 มีทิศทางและระยะเวลาการเกิดที่แน่นอน สาเหตุหลักเกิดจากความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิของพื้นดินและพื้นน้ำ ในช่วงฤดูหนาวซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิของพื้นดินเย็นกว่าพื้นน้ำของมหาสมุทร ก็จะทำให้เกิดลมพัดออกจากทวีป ขณะเดียวกันในช่วงหน้าร้อนอุณหภูมิพื้นน้ำของมหาสมุทรจะเย็นกว่าพื้นดิน ทำให้เกิดลมพัดจากมหาสมุทรเข้ามาภายในทวีป

1) ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ หรือลมมรสุมฤดูร้อน พัดปกคลุมประเทศไทยในช่วงย่างเข้าฤดูฝน คือประมาณช่วงกลางเดือนพฤษภาคมไปจนถึงกลางเดือนตุลาคม ซึ่งเกิดจากความกดอากาศสูงในซีกโลกใต้ บริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งพัดออกจากศูนย์กลางเป็นลมตะวันออกเฉียงใต้ และเปลี่ยนเป็น ลมตะวันตกเฉียงใต้เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตร ลมมรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนตกชุกทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเล และเทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่น

2) ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ หรือลมมรสุมฤดูหนาวที่พัดต่อจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะพัดผ่านประเทศไทยในช่วงฤดูหนาว คือ ในช่วงกลางเดือนตุลาคมไปจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ และในบางปีอาจจะมีไปจนถึงช่วงกลางเดือนมีนาคม ลมประเภทนี้เกิดจากความกดอากาศสูงบนซีกโลกเหนือแถบประเทศมองโกเลียและจีน [1]

2.3 ตัวป่งชี้ของสภาวะลมทางธรรมชาติ

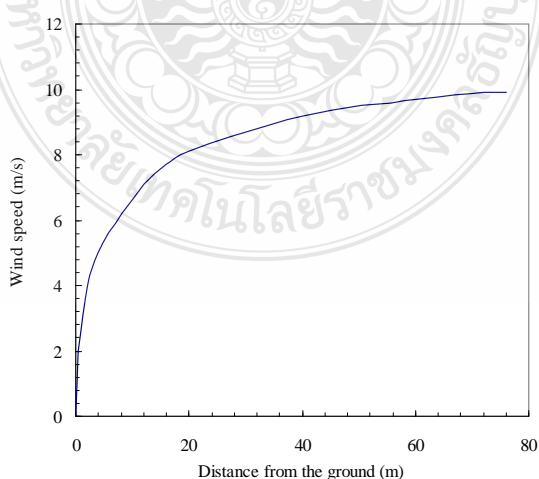
สภาพทางธรรมชาติสามารถบ่งบอกถึงสภาวะของลมในบริเวณนั้นๆ ได้ว่ามีความแรงมากน้อยเพียงใด โดยการดูจากสภาพทางธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น การสังเกตความแรงของลมจากสภาพของต้นไม้ในบริเวณที่มีกระแสลมแรงพัดผ่านอย่างต่อเนื่อง ลักษณะของกิ่งก้านจะคู่ตามลม ซึ่งแตกต่างจากต้นไม้ทั่วไป [2]



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของต้นไม้ในบริเวณที่มีลมแรงพัดผ่านประจำ [2]

2.4 การแปรค่าความเร็วลมตามความสูง

เนื่องจากกระแสลมที่พัดเหนือพื้นผิวโลกจะถูกหน่วงให้ช้าลงตามความเสียดทานของพื้นผิว และสิ่งที่ปกคลุมพื้นผิวโลก เช่น ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ทำให้ความเร็วลมที่แปรค่าตามความสูงจากพื้นผิวโลก มีลักษณะตามตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงจากพื้นผิวโลก [2]

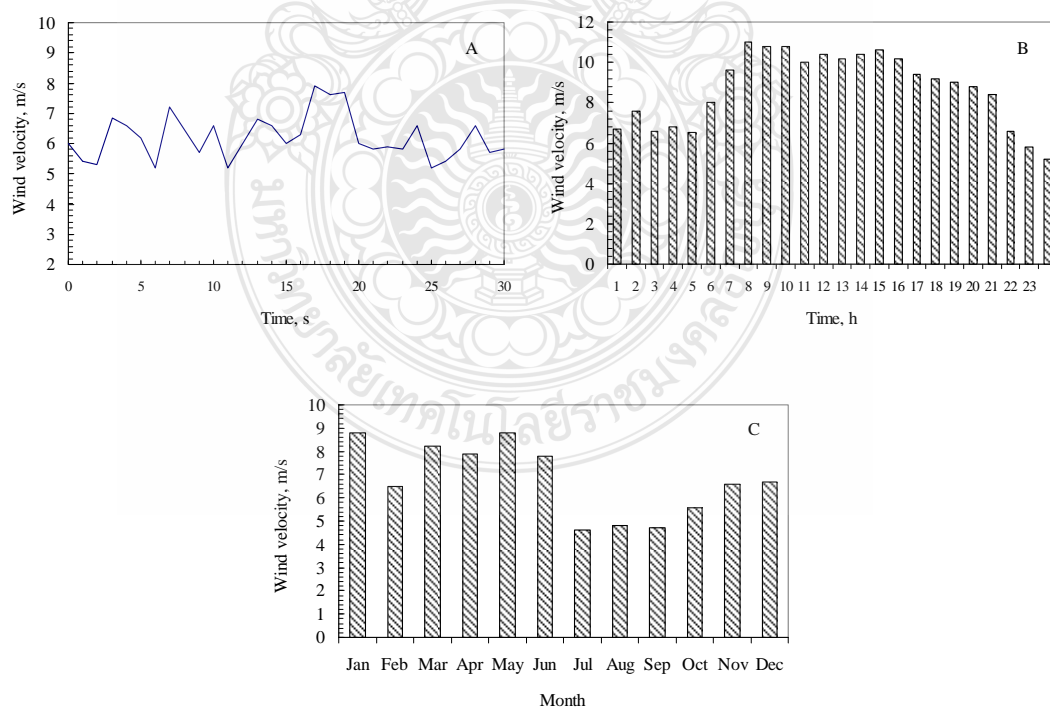
การแปรค่าของความเร็วมตามความสูงจะขึ้นกับความหยาบ (Roughness) ของพื้นผิวโลก และความสูง ในกรณีของพื้นผิวที่ราบเรียบ และไม่คิดผลจากอุณหภูมิของพื้นผิวจะสามารถเขียนในรูปสมการได้ ดังนี้ [2]

$$V(Z_R) = V(Z) \frac{\ln \frac{Z_R}{Z_0}}{\ln \frac{Z}{Z_0}} \quad (2.1)$$

เมื่อ $V(Z_R)$ = ความเร็วมที่ความสูง Z_R ซึ่งต้องการหา
 $V(Z)$ = ความเร็วมที่ความสูง Z ซึ่งทราบค่า
 Z_0 = roughness height

2.5 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วมตามสภาวะเวลา

ความเร็วมและทิศทางของลมจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะเวลา ซึ่งทำให้กำลังและพลังงานที่ได้จากลมนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ในช่วงเวลาหนึ่งของวัน หรือการเปลี่ยนแปลงในรอบวันและการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล

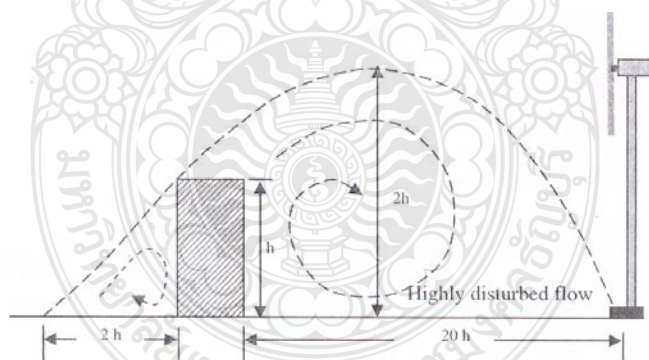


ภาพที่ 2.8 การแปรค่าของความเร็วมตามสภาวะเวลา [2]

การเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้นๆ แสดงอยู่ในภาพที่ 2.8 (A) ซึ่งเป็นการวัดในช่วงเวลา 30 วินาที ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความเร็วลมจะมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 5.1 เมตรต่อวินาทีถึง 7.2 เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลาเพียง 30 วินาที การเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในช่วงเวลาสั้นๆ ดังกล่าวนี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศอย่างรวดเร็ว สำหรับการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวัน (Diurnal Variation) ดังภาพที่ 2.8 (B) ส่วนใหญ่เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสองบริเวณอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงในรอบวัน ในด้านการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามฤดูกาล ดังภาพที่ 2.8 (C) จะเป็นผลมาจากความแตกต่างของรังสีดวงอาทิตย์ที่บริเวณต่างๆ ของโลกได้รับ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล [2]

2.6 ความปั่นป่วนของลม

ความเร็วและทิศทางของลมเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อพัดผ่านพื้นผิวขรุขระ อาคาร ต้นไม้ และสิ่งกีดขวางต่างๆ การเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางของลมดังกล่าวเกิดมาจากความปั่นป่วน (Turbulence) ของการไหล ภาพที่ 2.9 แสดงเส้นทางการเกิดความปั่นป่วนในบริเวณด้านหลังอาคารและใต้ลมของสิ่งกีดขวาง การเกิดความปั่นป่วนนี้ไม่เพียงแต่จะลดกำลังในกระแสลมลง แต่ยังลดแรงที่จะส่งไปยังกั้นหลังด้วย

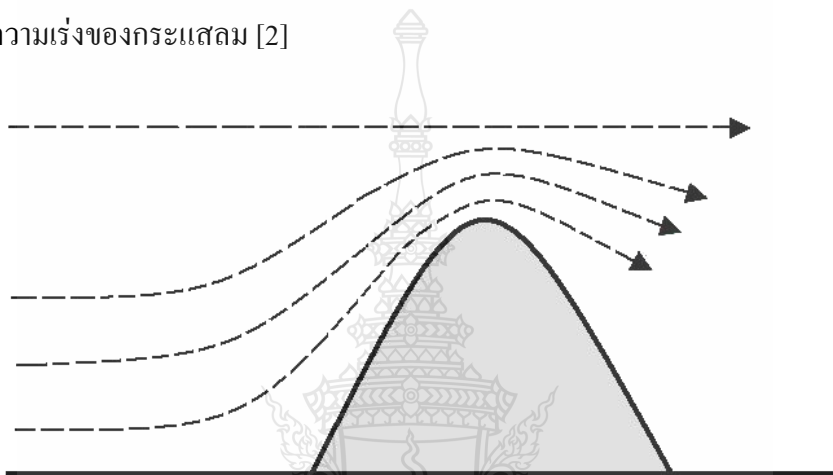


ภาพที่ 2.9 การเกิดความปั่นป่วนของลมเมื่อผ่านสิ่งกีดขวาง [2]

ความรุนแรงของความปั่นป่วนขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงของสิ่งกีดขวาง ในทางธรรมชาติ บริเวณการเกิดความปั่นป่วนมีผลในแนวตั้งประมาณ 2 เท่าของความสูงของสิ่งกีดขวางและส่งผลในแนวราบ 10-20 เท่าทางด้านใต้ลม ดังนั้นก่อนทำการติดตั้งกั้นหลัง จะต้องมีการพิจารณาสิ่งกีดขวางต่างๆ รอบพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งกั้นหลัง โดยพื้นที่ดังกล่าวควรจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ปราศจากความปั่นป่วน [2]

2.7 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม

สิ่งกีดขวางที่โค้งมนจะเร่งกระแสลมที่พัดผ่าน ดังภาพที่ 2.10 การเร่งนี้เกิดจากการบีบชั้นของอากาศเหนือส่วนโค้งนี้ ขนาดและทิศทางของความเร็วจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของส่วนโค้ง เราสามารถใช้ผลกระทบดังกล่าวในการช่วยเพิ่มพลังงานให้กับกังหัน พื้นที่ที่ทำมุมกับแนวราบ 6-16 องศา จะช่วยเพิ่มความเร็วลม สำหรับพื้นที่ที่ทำมุมมากกว่า 27 องศา หรือน้อยกว่า 3 องศา จะไม่ช่วยให้เกิดความเร่งของกระแสลม [2]



ภาพที่ 2.10 การเพิ่มขึ้นของความเร็วม เมื่อพัดขึ้นเนินเขา [2]

2.8 พลังงานของลม

กังหันลมได้รับกำลังงาน โดยการเปลี่ยนแรงของลมไปเป็นทอร์ค (Torque) ที่กระทำต่อใบกังหัน (Rotor Blades) ปริมาณของพลังงานที่ลมส่งผ่านไปยังใบกังหันขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Air Density) พื้นที่ของโรเตอร์ (Rotor Area) และ ความเร็วลม (Wind Speed) โดยปัจจัยแรกนั้น พลังงานจลน์ของลมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งเป็นปริมาณที่กล่าวถึงปริมาณมวลต่อหน่วยปริมาตร หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ กังหันลมจะได้รับพลังงานจากอากาศมากขึ้นเมื่อความหนาแน่นของอากาศมีค่าสูงขึ้น โดยทั่วไปแล้วที่ความดันบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 15°C อากาศจะหนักประมาณ 1.225 kg/m^3 โดยความหนาแน่นของอากาศจะลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้นหรืออุณหภูมิสูงขึ้น และความหนาแน่นของอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลงหรืออุณหภูมิต่ำลง ความหนาแน่นของอากาศยังสัมพันธ์กับระดับความสูง กล่าวคือ ที่ระยะความสูงมากขึ้น เช่น บนภูเขา ความดันบรรยากาศจะลดลงและอากาศจะเบาบางลง [1]

พลังงานลม (E_w) เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังนั้นอากาศที่มีมวล m ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์ ตามสมการดังนี้

$$E_w = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ E_w = พลังงานจลน์ของลม [N.m]
 m = มวลอากาศ [kg]
 v = ความเร็วของมวลอากาศ [m/s]

ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A สมการของอัตราการไหลของมวลต่อเวลา (\dot{m}) จะเป็นดังนี้คือ

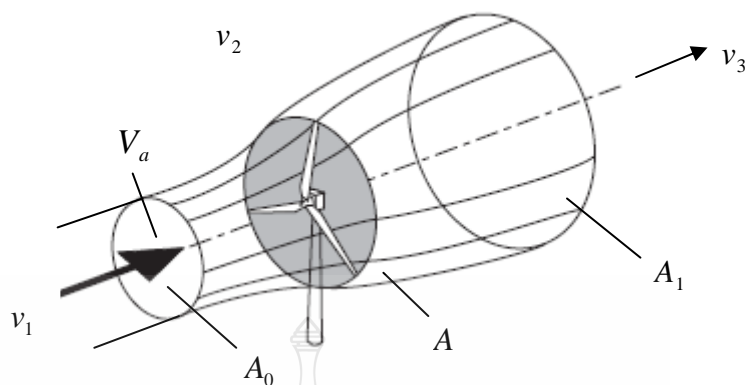
$$\dot{m} = \rho Av \quad (2.3)$$

เมื่อ \dot{m} = อัตราการไหลของมวลอากาศ [kg/s]
 ρ = ความหนาแน่นของอากาศ [kg/m^3]
 A = พื้นที่หน้าตัดที่มวลอากาศไหลผ่าน [m^2]
 v = ความเร็วของมวลอากาศ [m/s]

แทนสมการที่ 2.3 ในสมการที่ 2.2 จะได้สมการของพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลาซึ่งก็คือสมการของกำลังงานลม (P_w) นั่นเอง

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.4)$$

เมื่อ P_w = กำลังงานของลม [Watt]
 ρ = ความหนาแน่นของอากาศ [kg/m^3]
 A = พื้นที่หน้าตัดที่มวลอากาศไหลผ่าน [m^2]
 v = ความเร็วของมวลอากาศ [m/s]



ภาพที่ 2.11 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม [1]

จากภาพที่ 2.11 แสดงพลังงานลมที่สกัดได้ จากปริมาตรของอากาศ V_a ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_0 และมีความเร็วลม v_1 ขณะที่ผ่านกังหันลม ที่มีพื้นที่หน้าตัด A และความเร็วลมเป็น v_2 และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมไปแล้ว ทำให้ความเร็วลมถูกเปลี่ยนเป็น v_3 และมีพื้นที่หน้าตัด A_1 จะเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่หน้าตัด A_1 ถูกขยายขึ้น เมื่อ V_a เคลื่อนที่ผ่านกังหัน ซึ่งสามารถเขียนสมการพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_T = V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.5)$$

กำลังงานสามารถคำนวณได้จากพลังงานที่สกัดได้ต่อหน่วยเวลา

$$P_T = \frac{dW_T}{dt} = d \frac{V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2)}{dt} \quad (2.6)$$

ปริมาตรการไหลของอากาศในพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม (A)

$$\frac{dV_a}{dt} = Av_2 \quad (2.7)$$

ฉะนั้นจะได้

$$P_T = A \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) v_2 \quad (2.8)$$

ตามทฤษฎีของ อัลเบิร์ต เบทซ์ (Albert Betz) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน [3] ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม (A) ความเร็วลม และลักษณะใบของกังหันลม โดยกำลังงานสูงสุดที่กังหันลมสามารถสกัดได้คือ

$$P_{T \max} = \frac{16}{27} A \frac{\rho}{2} v_1^3 \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 ประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมคือ 59.26% ($16/27 \times 100\%$) ซึ่งที่ประสิทธิภาพสูงสุดนี้ ความสัมพันธ์ความเร็วลมจะเป็นไปตามสมการ

$$v_2 = \frac{2}{3} v_1 \text{ และ } v_3 = \frac{1}{3} v_1 \quad (2.10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) หรือ C_p เป็นตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยที่กราฟคุณลักษณะ C_p เป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัดของกังหันลม ค่า C_p มีนิยามคือ

$$C_p = \frac{P_T}{P_w} \quad (2.11)$$

สมการที่ 2.4 คือ กำลังงานของลม แต่กำลังงานที่กังหันลมสกัดได้จริง จะแปรผันตามค่า C_p ฉะนั้นเมื่อกังหันลมมีพื้นที่หน้าตัดที่รับลมเป็นวงกลม สมการกำลังอากาศพลศาสตร์ จะได้เป็น

$$P_T = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p \quad (2.12)$$

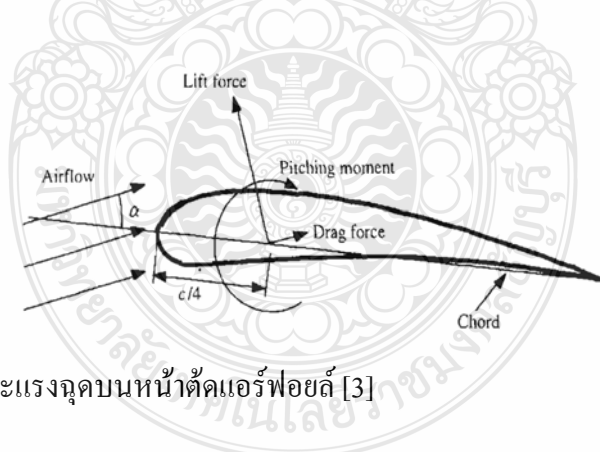
หรือ

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2.13)$$

เมื่อ	W_T = พลังงานที่กักเก็บลมสกัดได้ [N.m]
	P_T = กำลังงานที่กักเก็บลมสกัดได้ [Watt]
	V_a = ปริมาตรการไหลของอากาศ [m^3/s]
	v_1 = ความเร็วลมก่อนผ่านใบกังหัน [m/s]
	v_2 = ความเร็วลมขณะผ่านใบกังหัน [m/s]
	v_3 = ความเร็วลมหลังจากผ่านใบกังหัน [m/s]
	A = พื้นที่หน้าตัดหรือพื้นที่กวาดของใบกังหันลม [m^2]
	A_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนผ่านใบกังหันลม [m^2]
	A_1 = พื้นที่หน้าตัดหลังผ่านใบกังหันลม [m^2]

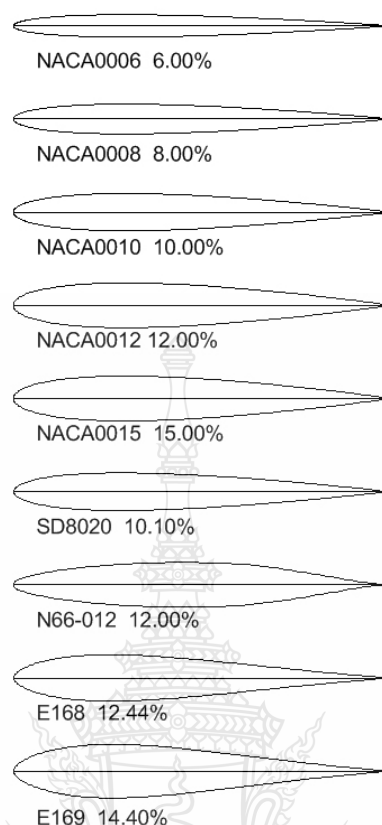
2.9 การเกิดแรงยกและแรงดูดบนแอร์ฟอยล์

แรงที่กระทำต่อแอร์ฟอยล์ (Airfoil) และแรงดังกล่าวอยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลจะถูกเรียกว่า “แรงยก” (Lift Force) แทนด้วยสัญลักษณ์ “ L ” และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแผ่นอากาศซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนที่ผิว และจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหลจะถูกเรียกว่า “แรงดูด” (Drag Force) แทนด้วยสัญลักษณ์ “ D ” สำหรับการไหลในที่นี่จะหมายถึงการไหลของความเร็วลมสัมพัทธ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แรงยกและแรงดูดบนหน้าตัดแอร์ฟอยล์ [3]

ทั้งนี้ลักษณะหน้าตัดของแอร์ฟอยล์มีหลายรูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ซึ่งจะมีแรงที่กระทำกับแอร์ฟอยล์แตกต่างกันไปตามลักษณะรูปร่าง โดยควรเลือกรูปแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน



ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างหน้าตัดแอร์ฟอยล์แบบต่างๆ [4]

2.10 ทฤษฎีการออกแบบกังหันลม

2.10.1 ทฤษฎีสตริป (Strip Theory) บางครั้งจะเรียกทฤษฎีนี้ว่า Glauert Annulus Momentum Vortex Theory เป็นการแบ่งโดเมนของการไหลผ่านใบกังหันออกเป็นวงแหวนในแนวรัศมี (r) ของใบ (Strip หรือ Annular Stream Tube) แล้วทำการวิเคราะห์การถ่ายเทมวลและโมเมนตัมในวงแหวนนี้ ภายใต้อธิบาย Strip Theory จะมีทฤษฎีย่อย ๆ ประกอบอยู่ด้วยดังนี้ [5]

1) ทฤษฎีโมเมนตัม Momentum Theory

การวิเคราะห์โดยใช้หลักการของทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum Theory) ในเบื้องต้นจะตั้งสมมุติฐาน (Assumption) ขึ้นมาดังนี้

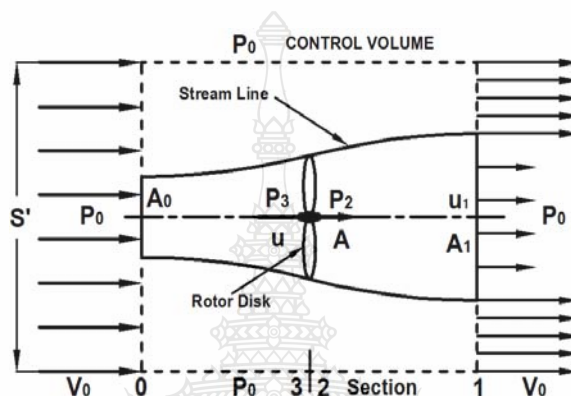
- ลมที่พัดเข้ามาจะต้องมีการไหลที่สม่ำเสมอต่อเนื่อง (Homogeneous Wind Flow)
- ไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลทางเข้าอุโมงค์ลม และทางออกของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการ

ทดสอบ (No Obstruction to Wind Flow Either Upstream or Downstream)

- การเคลื่อนที่ของลมไม่มีการปั่นป่วนที่ใบกังหัน (Uniform Flow Velocity at Rotor)

- ลมที่ไหลเข้ามาต้องคิดว่าเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Wind Flow) ซึ่งไม่มีผลในเรื่องของอุณหภูมิ (Temperature Effect) มาเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์

จากภาพที่ 2.14 บอกให้ทราบว่า มีตัวแปรใดบ้างที่มีความจำเป็นในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์กึ่งหันลม ตัวแปร S หรือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ที่ต้องนำมาใช้และอยู่ในขอบเขตของการวิเคราะห์ปริมาตรทั้งหมดของระบบ (Control Volume)



ภาพที่ 2.14 การวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีโมเมนตัม [5]

ในการวิเคราะห์ทฤษฎีของ Momentum นั้นเราสมมุติว่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้องที่ปกติ มีค่าความหนาแน่น 1.225 kg/m^3 และจากกฎของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity Equation) นั้น การไหลต้องเท่ากันทั้งระบบ นั่นคือ $\dot{Q} = AV$ จะได้ $V_0 A_0 = uA = u_1 A_1$ จากกฎของเบอร์นูลลี วิเคราะห์ในส่วนของความดัน ตั้งแต่ส่วนที่ 0 ถึงส่วนที่ 3 และจากส่วนที่ 2 ถึงส่วนที่ 1 ของภาพที่ 2.14 จะได้ผลการวิเคราะห์ คือ

$$\frac{1}{2} \rho V_0^2 + P_0 = \frac{1}{2} \rho u^2 + P_3 \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + P_2 = \frac{1}{2} \rho u_1^2 + P_0 \quad (2.15)$$

แรงผลัก (Thrust) หรือ T_a ที่เกิดขึ้นในใบกังหันจะได้

$$T_a = PA = (P_3 - P_2)A \quad (2.16)$$

$(P_3 - P_2)$ คือ การที่พลังงานจากลมได้ถ่ายทอดให้กับแผ่นดิสก์เรียบร้อยแล้ว ซึ่งพลังงานจะถูกสะสมอยู่ในใบกังหันนั่นเอง หรือถ้าวิเคราะห์ในเทอมของความเร็วลมก็จะได้แรงผลักดันที่เกิดขึ้นกับใบกังหัน คือ

$$T_a = \frac{\rho A (V_0^2 - u_1^2)}{2} \quad (2.17)$$

สมการที่ 2.17 ได้มาจากพลังงานจลน์ของลม คือ $KE = \frac{1}{2} \rho A V^2$ แต่จากสมการที่ 2.17 จะเห็นว่าพลังงานได้ถ่ายเทให้ใบกังหันไปแล้ว ซึ่งจะได้

$$A u = A_1 u_1 \quad \text{ดังนั้น} \quad u = \left(\frac{V_0 + u_1}{2} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ u คือความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมดของระบบที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งในระบบจะต้องมีการสูญเสีย เรียกว่า Axial Interference Factor (a) ค่านี้คือค่าสัดส่วนการลดของพลังงาน ระหว่างลมที่เข้ามาอย่างอิสระ และลมที่ปะทะตัวใบกังหัน นั่นคือ

$$a = \frac{v}{V_0} \quad (2.19)$$

โดยที่ $v = V_0 - u$ ดังนั้น เมื่อแทนค่า $v = V_0 - u$ เป็นค่าของการสูญเสียในสมการที่ 2.19 จะได้

$$u = V_0(1 - a) \quad (2.20)$$

และเมื่อแทนค่า u ในสมการที่ 2.18 จะได้

$$u_1 = V_0(1 - 2a) \quad (2.21)$$

ในการวิเคราะห์ พบว่าถ้า a มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือไม่มีการรบกวนของระบบเลย หมายถึงค่าของลมทางเข้าและทางออกไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นไปไม่ได้ และขณะเดียวกันถ้า

มีค่าเท่ากับ 1 นั่นคือไม่มีพลังงานของลมถ่ายเทให้แก่วังกังหันเลย ซึ่งไม่ต้องการเช่นกัน สามารถหาได้ว่าพลังงานจากลมถูกถ่ายเทให้กับใบกังหันลมเท่าใดจากสมการ

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A V_0^2 - \frac{1}{2} \rho A u_1^2 \quad (2.22)$$

เมื่อแทนค่า u_1 จะได้

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2 \quad (2.23)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันลมโดยทั่วๆ ไปจะคิดพลังงานจากลมที่เกิดจากการไหลอิสระ ซึ่งมีสูตรในการคำนวณพลังงานลมต่อหน่วยเวลาที่ไหลผ่านพื้นที่รับลมใดๆ คือ

$$P_w = (\text{ปริมาตรของการไหล}) \times (\text{พลังงานจลน์ของลมต่อปริมาตรการไหล})$$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลม Power Coefficient หรือ C_p เป็นการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่กังหันลมสามารถดึงเอาไว้ได้ กับพลังงานที่ควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ถ้าวิเคราะห์ทางกลก็คือพลังงานที่กังหันลมผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบนั่นเอง ดังสมการ

$$C_p = \frac{P_T}{P_w} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} \quad (2.24)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.25)$$

$$C_p = 4a - 8a^2 + 4a^3 \quad (2.26)$$

ดังนั้นถ้าต้องการทราบว่ากังหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดได้เท่าใด สามารถหาได้โดยการ Differentiate สมการที่ 2.26 นั่นคือ

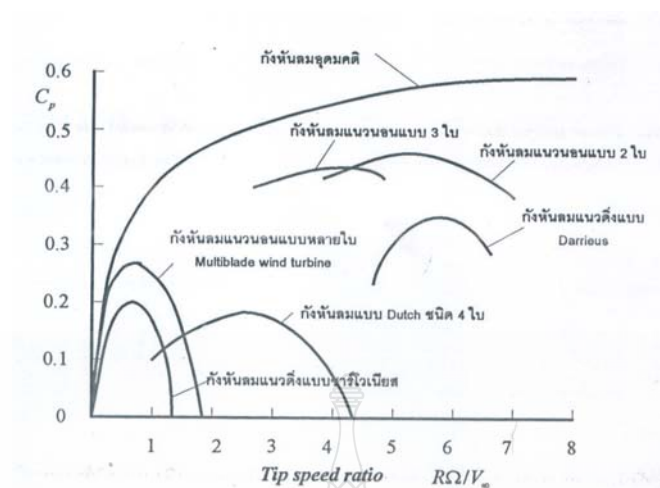
$$\frac{dC_p}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0 \quad (2.27)$$

$$12a^2 - 16a + 4 = 0$$

$$\text{แก้สมการ ได้ค่า } a = \frac{2 \pm 1}{3} ; a = 1 \text{ และ } a = \frac{1}{3}$$

เมื่อ	V_0	= ความเร็วลมทางด้านเข้า และทางด้านออกของ Control Volume [m/s]
	u	= ความเร็วลมที่ใบกังหันหรือแผ่นจาน [m/s]
	u_1	= ความเร็วลมหลังจากผ่านใบกังหันหรือแผ่นจานทดสอบ [m/s]
	P_0	= ความดันบรรยากาศทั่ว ๆ ไป [N/m ²]
	P_2	= ความดันอากาศหลังผ่านใบกังหัน [N/m ²]
	P_3	= ความดันอากาศที่ปะทะตัวใบกังหัน [N/m ²]
	A_0	= พื้นที่หน้าตัดอากาศทางเข้า [m ²]
	A	= พื้นที่แผ่นจานหรือพื้นที่กวาดของใบ [m ²]
	A_1	= พื้นที่หน้าตัดอากาศทางออก [m ²]
	ρ	= ความหนาแน่นของอากาศ [kg/m ³]
	\dot{Q}	= อัตราการไหลของอากาศ [m ³ /s]
	T_a	= แรงผลักรู้ที่เกิดขึ้นกับใบกังหัน [N.m]
	P_T	= กำลังงานที่ได้จากกังหันลม [Watt]
	P_w	= กำลังงานของลม [Watt]
	C_p	= สัมประสิทธิ์กำลัง

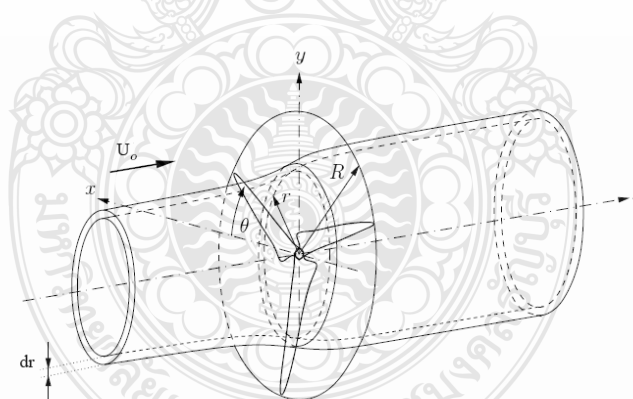
สมการจะเป็นจริงได้เมื่อแทนค่า $a = \frac{1}{3}$ ลงในสมการที่ 2.26 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม เรียกว่า $C_{p_{\max}}$ มีค่าเท่ากับ 0.592 ซึ่งค่าที่ได้นี้มีค่าเท่ากับทฤษฎีของ Betz ตามที่ได้กล่าวไว้แล้ว นั่นคือ ถ้าลมให้พลังงานมา 100 % กังหันลมสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดเพียง 59.2 % เท่านั้น เนื่องด้วยปัจจัยหลายๆ อย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป ภาพที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ



ภาพที่ 2.15 ประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ [5]

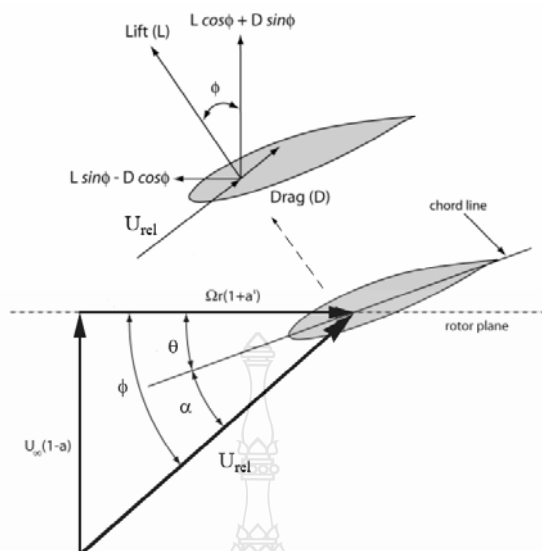
2) ทฤษฎี Blade Element Theory (BET)

เป็นการพิจารณาแรงที่กระทำบนใบกังหันในลักษณะสองมิติ โดยแบ่งใบกังหันออกเป็นส่วนๆ ตามความยาว (Span-Wise) แล้วคำนวณค่าคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น แรงยก แรงจุด ที่เป็นผลของมุมปะทะ และความเร็ว ในแต่ละส่วนของใบกังหันที่แบ่งไว้ สำหรับความเร็วในแนวตามความยาวของใบ (Span) จะไม่นำมาพิจารณา นั่นคือไม่นำผลในสามมิติมาพิจารณานั้นเอง



ภาพที่ 2.16 การวิเคราะห์ตามทฤษฎี BET [5]

พิจารณาใบกังหันในแต่ละส่วน (Blade Element) ความเร็วที่เกิดขึ้น แบ่งได้เป็นความเร็ว ในแนวแกน (Axial) และความเร็วในแนวสัมผัสหรือแนวการหมุน (Tangential) ความเร็วในแนวแกนที่ส่วนของใบกังหันจะมีค่า $V_0(1-a)$ และความเร็วแนวสัมผัสคือ $r\Omega(1+a')$



ภาพที่ 2.17 แรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของใบกังหันลม [5]

พิจารณาเวกเตอร์ตามภาพที่ 2.17 จะได้ความสัมพันธ์

$$\tan \phi = \frac{V_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} = \frac{u}{\omega} \quad (2.28)$$

เมื่อ ϕ เป็นมุมความเร็วลมสัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับมุมปะทะ (Angle of Attack) รวมกับมุมพิทช์ (Pitch Angle) โดย $\phi = \alpha + \theta$ สำหรับแรงยกในแต่ละส่วนของใบกังหัน ตามทิศทางตั้งฉากกับความเร็วมสัมพัทธ์คือ

$$dL = \frac{1}{2} \rho dA_b U_{rel}^2 C_L \quad (2.29)$$

และแรงจุดในแต่ละส่วนของใบกังหัน ตามทิศทางขนานกับความเร็วมสัมพัทธ์คือ

$$dD = \frac{1}{2} \rho dA_b U_{rel}^2 C_D \quad (2.30)$$

จากภาพที่ 2.17 จะได้ผลลัพธ์ของแรงที่เกิดขึ้นดังนี้คือ [6]

$$\text{แรงในแนวแกน} \quad dF_T = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (2.31)$$

$$\text{แรงในแนวรัศมี} \quad dF_Q = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad (2.32)$$

$$\text{ทอร์กในแนวรัศมี} \quad dQ = r(dL \sin \phi - dD \cos \phi) \quad (2.33)$$

$$\text{โดย} \quad U_{rel}^2 = \omega^2 + u^2 \quad (2.34)$$

$$\text{ไม่มีการสูญเสียในแนวรัศมี} \quad \omega = r\Omega = u \cot \phi \quad (2.35)$$

ดังนั้นสมการของแรงในแนวแกน และทอร์กในแนวรัศมีสำหรับกังหัน [6] คือ

$$dF_T = \frac{1}{2} \rho dA_b u^2 (1 + \cot^2 \phi) (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \quad (2.36)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho dA_b u^2 r (1 + \cot^2 \phi) (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \quad (2.37)$$

กำลังงานที่ได้จากใบกังหัน [6]

$$dP = \Omega dQ \quad (2.38)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho dA_b u^3 \cot \phi (1 + \cot^2 \phi) (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \quad (2.39)$$

2.10.2 การออกแบบโดยใช้ Blade Element Momentum (BEM)

เป็นการนำเอา Momentum Theory มารวมเข้ากับ Blade Element Theory สมมุติฐานของทฤษฎี BEM คือแรงกระทำบนใบกังหัน เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอากาศที่วิ่งผ่านตลอดวงแหวนที่กำหนดขึ้น นั่นคือไม่คิดผลของการไหลในแนวรัศมีไปตาม Span หรือไม่มีการถ่ายเทการไหลในแต่ละวงแหวน เงื่อนไขนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อค่า a ไม่เปลี่ยนแปลงในแนวรัศมี นำเอา BET รวมกับ MT $\partial T|_{BET} = \partial T|_{MT}$ และ $\partial Q|_{BET} = \partial Q|_{MT}$ จะได้ความสัมพันธ์เป็น [5]

$$B \frac{1}{2} \rho \left[\frac{V_0(1-a)}{\sin \phi} \right]^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) c dr = 4a(1-a) \rho V_0^2 \pi r dr \quad (2.40)$$

$$B \frac{1}{2} \rho \left[\frac{r\Omega(1+a')}{\cos \phi} \right]^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) c r dr = 4a'(1-a) \rho V_0 \pi r^3 \Omega dr \quad (2.41)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{a}{1-a} = \frac{Bc}{8\pi r} \left(\frac{C_L \cos \phi + C_D \sin \phi}{\sin^2 \phi} \right) \quad (2.42)$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{Bc}{8\pi r} \left(\frac{C_L \sin \phi - C_D \cos \phi}{\sin^2 \phi \cos \phi} \right) \quad (2.43)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สามารถคำนวณได้จาก

$$C_p = \frac{P}{P_{tot}} = \frac{\int_H^R \Omega dQ}{0.5 \rho \pi R^2 U^3} \quad (2.44)$$

เนื่องจากการสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss) จึงต้องมีการปรับแก้ค่า C_p ในสมการที่ 2.44 โดยคูณ Tip Loss Factor (F) ซึ่ง Prandtl ได้เสนอไว้ และ Wilson ได้สรุปสำหรับกังหันลมไว้ดังนี้

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left[-\frac{B(R-r)}{2r \sin \phi} \right] \right) \quad (2.45)$$

เมื่อกระจายสมการที่ 2.44 ออกมาใหม่จะได้ความสัมพันธ์ของ C_p เป็น

$$C_p = \frac{2}{\lambda R} \int_H^R F \frac{\sigma' \lambda_r^2 (1-a) C_L}{\sin^2 \phi} \left[\sin \phi - \frac{C_D \cos \phi}{C_L} \right] dr \quad (2.46)$$

เมื่อ $\lambda = \Omega R / V_0$ (λ คือ Tip Speed Ratio, TSR) และค่า $\sigma' = Bc / 2\pi r$ เรียกว่า Local Solidity

เมื่อ	a	=	แฟกเตอร์ความสูญเสียในแนวแกน
	a'	=	แฟกเตอร์ความสูญเสียในแนวรัศมี
	ϕ	=	มุมความเร็วลมสัมพัทธ์
	c	=	ความยาวคอर्ड [m]
	L	=	แรงยก [N]
	D	=	แรงจุด [N]
	A_b	=	พื้นที่ระนาบแพนอากาศ [m ²]
	r	=	ระยะรัศมีจากแกนเพลลาถึงจุดวิเคราะห์ [m]
	R	=	รัศมีใบกังหัน [m]
	H	=	ระยะรัศมีของคอกังหัน [m]
	B	=	จำนวนใบกังหันลม
	U_{rel}	=	ความเร็วลมสัมพัทธ์ [m/s]
	V_0	=	ความเร็วลมอิสระ [m/s]
	u	=	ความเร็วลมที่ใบกังหัน [m/s]
	C_L	=	สัมประสิทธิ์แรงยก
	C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงจุด
	F_T	=	แรงในแนวแกน [N]
	F_Q	=	แรงในแนวรัศมี [N]
	Q	=	ทอร์กในแนวรัศมี [N.m]
	P	=	กำลังงานที่ได้จากใบกังหัน [Watt]
	Ω	=	ความเร็วเชิงมุมใบกังหัน [rad/s]
	ρ	=	ความหนาแน่นอากาศ [kg/m ³]
	λ	=	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ

2.11 ประเภทของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

โดยทั่วไปการแบ่งประเภทของกังหันลมผลิตไฟฟ้าสามารถทำได้ 2 ลักษณะคือ แบ่งตามขนาดกำลังการผลิต และแบ่งตามลักษณะการวางตัวของแกนเพลลา

2.11.1 แบ่งตามขนาดกำลังการผลิต การแบ่งแยกประเภทของกังหันลมผลิตไฟฟ้าตามกำลังการผลิต (กิโลวัตต์) สามารถแบ่งแยกได้เป็น กังหันลมขนาดเล็ก กังหันลมขนาดกลาง กังหันลมขนาดใหญ่ และกังหันลมขนาดใหญ่มาก [7] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งกังหันลมตามขนาดกำลังผลิต

ประเภทของกังหันลม	กำลังการผลิต (kW)
กังหันลมขนาดเล็ก	น้อยกว่า 1.5 kW
กังหันลมขนาดกลาง	1.5 kW – 20 kW
กังหันลมขนาดใหญ่	20 kW – 200 kW
กังหันลมขนาดใหญ่มาก	มากกว่า 1,500 kW

2.11.2 แบ่งตามลักษณะการวางตัวของแกนเพลาคือ กังหันลมที่มีแกนเพลาลู่ในแนวแกนนอน และกังหันลมที่มีแกนเพลาลู่ในแนวแกนตั้ง

1) กังหันลมที่มีแกนเพลาลู่ในแนวแกนนอน (Horizontal-Axis Wind Turbine, HAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนวางตัวอยู่ในทิศทางของลม โดยมีใบเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม กังหันลมประเภทนี้ ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการติดตั้งบนเสาที่มีความสูงเหมาะสมแล้ว กังหันลมประเภทนี้จะให้ประสิทธิภาพที่ดี [7] ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 กังหันลมแกนนอน [8]

2) กังหันลมที่มีแกนเพลายู่ในแนวตั้ง (Vertical-Axis Wind Turbine, VAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของลม สามารถรับลมได้ทุกทิศทางและติดตั้งอยู่ในระดับต่ำได้ กังหันลมแบบนี้ ที่รู้จักกันดีคือกังหันลมแบบแดร์เรียส (Darrieus) ซึ่งออกแบบโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส ข้อดีของกังหันลมแกนตั้งคือ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง มีชุดปรับความเร็ว และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่สามารถติดตั้งอยู่ระดับพื้นล่างได้ นอกจากนี้ตัวเสาของกังหันลมยังไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพต่ำ เมื่อเทียบกับกังหันลมที่มีแกนเพลาระบบแกนนอน ปัจจุบันจึงมีการใช้งานอยู่ไม่มาก ลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวแกนตั้ง [7] แสดงดังภาพที่ 2.19

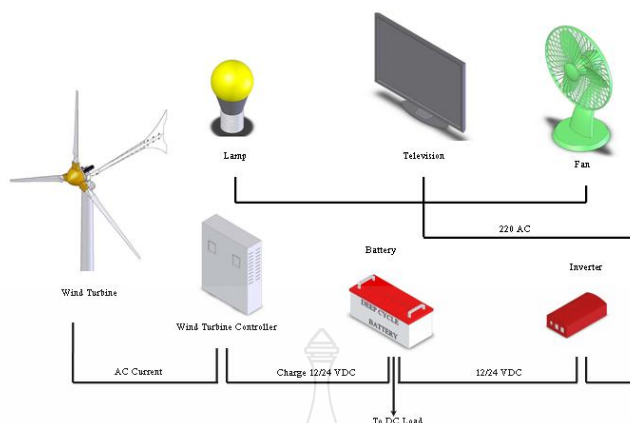


ภาพที่ 2.19 กังหันลมแกนตั้ง [9]

2.12 ระบบการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ระบบการติดตั้งกังหันลม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบการติดตั้งแบบเดี่ยว (Stand Alone System) และระบบการติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System)

2.12.1 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว (Stand Alone System) ดังแสดงในภาพที่ 2.20 เป็นระบบที่ต้องใช้ชุดเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับเป็นที่เก็บพลังงาน (Battery Bank) ซึ่งระบบนี้จะต้องมีการควบคุมการทำงานให้สัมพันธ์กันกับระบบควบคุมการทำงานของกังหันลม (Wind Turbine Controller) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้เป็นไปตามความเร็วลมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ระบบควบคุมการทำงานของกังหันลมจะต้องมีระบบป้องกันตัวเอง (Self Protection) เพื่อป้องกันกังหันลมไม่ให้เกิดความเสียหาย ในกรณีที่ความเร็วลมของกังหันลมมีค่ามากเกินไปที่ออกแบบไว้ โดยระบบควบคุมการทำงานของกังหันลมนี้จะเป็นการทำงานคู่กัน ระหว่างระบบทางกลและระบบทางไฟฟ้า ระบบการติดตั้งแบบนี้ เหมาะสำหรับการติดตั้งใช้งานในที่พักอาศัย ชุมชน หรือพื้นที่ที่ห่างไกลจากสายส่งหลัก เช่น บนเกาะหรือชนบทห่างไกลที่ระบบสายส่งเข้าไปไม่ถึง [7]

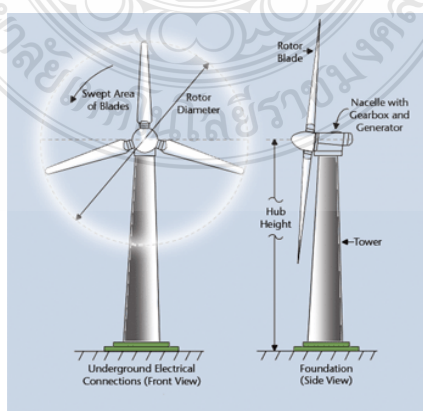


ภาพที่ 2.20 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว [5]

2.12.2 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System) เป็นการติดตั้งใช้งานสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำกรเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องมีชุดเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่ (Battery Bank) โดยชุดแปลงไฟฟ้า (Inverter & Converter) ของระบบนี้ต้องมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนและสามารถเชื่อมต่อเข้าระบบสายส่งได้ (GridTieTransfer) อีกทั้งชุดแปลงไฟฟ้าของระบบนี้ยังมีหน้าที่สำคัญ ที่จะต้องควบคุมแรงดันหรือความถี่ทางไฟฟ้าให้เหมาะสมและสามารถป้อนกระแสไฟฟ้าขนานไปกับไฟฟ้าจากสายส่งหลักได้ [7]

2.13 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

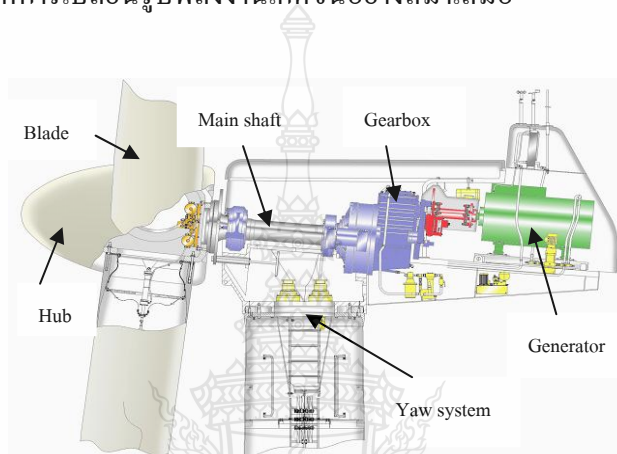
ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่แนวแกนนอน โดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ คือ ชุดโรเตอร์ ห้องเครื่อง และเสากังหันลม ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 ส่วนประกอบของกังหันลมขนาดใหญ่แกนนอน [10]

2.13.1 ชุดกังหัน (Rotor)

กังหันทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานจลน์จากกระแสลม ให้เป็นพลังงานกลเพื่อนำไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชุดกังหันเป็นชุดอุปกรณ์ ที่ประกอบด้วย ใบพัด และคุมใบพัด (Hub) โดยจะเชื่อมต่อกับเพลาหลัก (Main Shaft) คุมใบพัดทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายทอดกำลังระหว่างใบพัดกับเพลา กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ คุมใบพัดถูกออกแบบมาให้มีระบบปรับมุมปะทะของใบกังหัน (Variable Pitch) เพื่อให้การเปลี่ยนรูปพลังงานเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 2.22 ส่วนประกอบภายในห้องเครื่อง [1]

2.13.2 ห้องเครื่อง (Nacelle)

ทำหน้าที่เป็นตัวเรือน (Housing) สำหรับติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ ชุดอุปกรณ์ต่างๆ องค์ประกอบภายในของห้องเครื่องแตกต่างกันไปตามเทคโนโลยีของกังหันลม ซึ่งจะประกอบด้วย

- 1) เพลาหลัก (Main Shaft) เป็นเพลาส่งกำลังจากโรเตอร์กังหันลมเพื่อไปขับชุดเกียร์
- 2) เกียร์ทดรอบ (Gear Box) ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วยกขึ้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้มีความเร็วรอบ ที่สามารถจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบสายส่งได้
- 3) เพลารอง (High Speed Shaft) เป็นตัวส่งกำลังจากห้องเกียร์ไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีความเร็วรอบสูง
- 4) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกล ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบคือ Asynchronous Generator และแบบ Synchronous Generator
- 5) ระบบหันเหทิศทางการของห้องเครื่อง (Yaw System) ทำให้ห้องเครื่องสามารถหมุนได้รอบตัวบนยอดเสา เพื่อให้ใบพัดปรับรับตามทิศทางลม ระบบนี้มักประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และเฟืองวงแหวน โดยรับสัญญาณมาจากเครื่องวัดทิศทางลมที่ติดตั้งอยู่บนของห้องเครื่อง

2.13.3 เสา (Tower)

เสาทำหน้าที่รับน้ำหนักของห้องเครื่องและโรเตอร์ ซึ่งจะยกชุดกังหันลมให้สูงขึ้นจากพื้น โดยให้อยู่ในบริเวณลมที่มีความเร็วสูงและสม่ำเสมอ เพื่อให้พ้นจากสิ่งกีดขวางทางลม อาทิ ต้นไม้ สิ่งปลูกสร้าง เนินเขา ซึ่งต้องสามารถรับแรงลมที่เข้าปะทะกับโรเตอร์ได้ เสาของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยทั่วไปมี 2 แบบคือ

1) เสาแบบโครงถัก (Lattice Tower) มีข้อดีคือ สร้างง่าย แข็งแรง สามารถใช้กับกังหันลมขนาดใหญ่กำลังผลิตสูงๆได้ การขนส่งติดตั้งทำได้สะดวก และมีราคาถูก ดังแสดงในภาพที่ 2.23

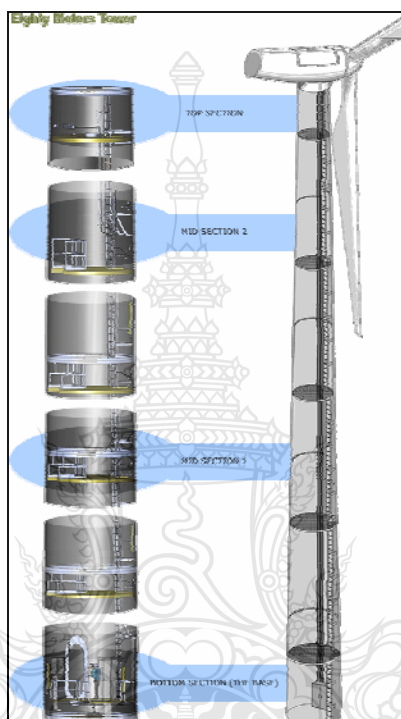


ภาพที่ 2.23 เสาแบบโครงถัก [11]



ภาพที่ 2.24 ทุ่งกังหันลมเสาแบบโครงถัก [12]

2) เสาแบบท่อเรียว (Tubular Tower) เสาชนิดนี้ต้องการการคำนวณออกแบบที่แม่นยำ สร้างยาก ราคาแพง ข้อดีที่สำคัญคือมันคงแข็งแรง ภายในของเสาสามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้หลายอย่าง เช่น บันไดหรือลิฟต์ ไว้สำหรับการซ่อมบำรุง นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบรูปทรงให้เข้ากับ ตัวกังหัน และห้องเครื่อง เพื่อให้ดูกลมกลืนกับสิ่งแวดล้อม สวยงาม ดังแสดงในภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 โครงสร้างภายในเสากังหันลมแบบท่อเรียว [13]

2.14 ตัวประกอบกำลังผลิต (Capacity Factor)

เนื่องจากความเร็วลมไม่คงที่ ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากลมนั้นจะมีค่าไม่เท่ากับ กำลังผลิตติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคูณด้วยจำนวนชั่วโมงทั้งหมดใน 1 ปี (โดยทั่วไปคิดที่ 8,760 ชั่วโมงต่อปี) ดังนั้นจึงนิยามค่าดัชนีชี้วัดตัวหนึ่ง ที่คำนวณจากค่าสัดส่วนของพลังงานที่ผลิตได้จริงต่อพลังงานสูงสุดที่คาดว่าจะผลิตได้ เรียกว่า ตัวประกอบกำลังผลิต (Capacity Factor) หรือ CF

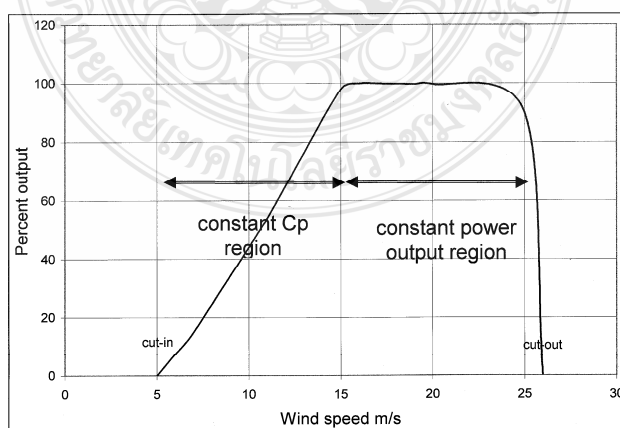
ค่าตัวประกอบกำลังผลิต จะคิดจากสัดส่วนระหว่างปริมาณที่กังหันลมผลิตได้ในรอบ 1 ปี (Annual Energy Production, AEP) กับพลังงานเมื่อกังหันลมทำงานที่พิกัดกำลังผลิต ตามสมการ

$$CF(\%) = 100 \times \frac{AEP}{(\text{Rated Power} \times 365 \times 24)} \quad (2.47)$$

กล่าวคือ กังหันลมตัวที่มีค่า CF สูงกว่ากังหันลมที่มีค่า CF ต่ำกว่า ก็จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า ซึ่งค่า CF ของกังหันลม จะแปรผันตามคุณลักษณะของลมในพื้นที่ที่จะนำกังหันลมไปติดตั้ง ค่า CF ของกังหันลมจะแตกต่างจากค่า CF ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ ซึ่งถูกกำหนดโดยต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับเชื้อเพลิง ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า รวมถึงระยะเวลาสำหรับการซ่อมบำรุง พลังงานนิวเคลียร์ มีค่า CF สูงมาก สามารถมีค่าได้ถึง 90 % อันเนื่องมาจากต้นทุนเชื้อเพลิงต่อหน่วยที่ต่ำและเดินเครื่องได้เต็มพิกัดตลอดเวลา สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก๊าซเทอร์ไบน์ ซึ่งมีต้นทุนเชื้อเพลิงต่อหน่วยที่สูง จะมีค่า CF ที่ต่ำ คือประมาณ 5-25% [1]

2.15 ช่วงการทำงานของกังหันลม

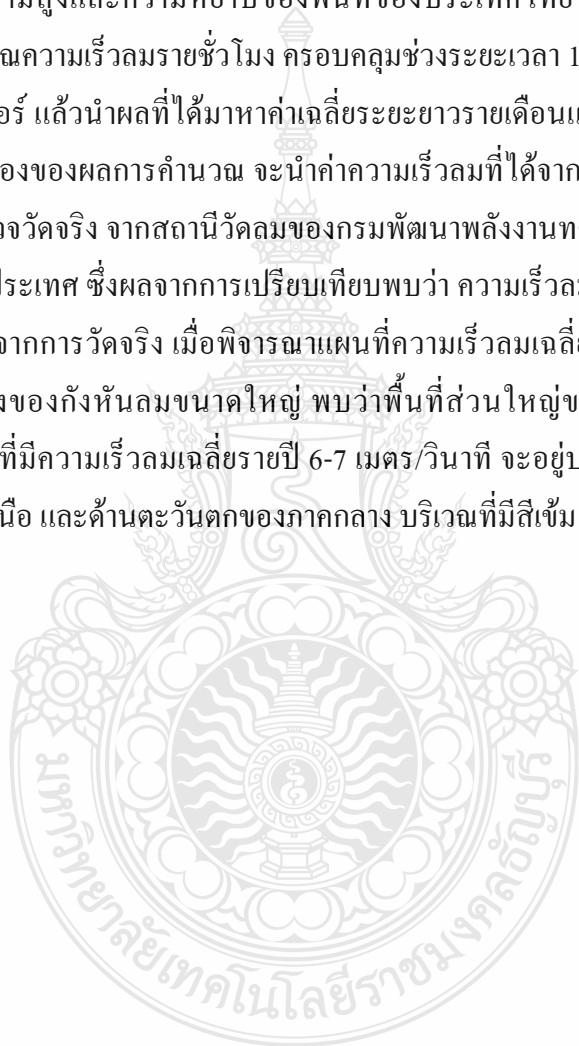
ช่วงการทำงานของกังหันลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง ดังภาพที่ 2.26 ซึ่งแสดงกำลังการผลิตไฟฟ้ากับความเร็วลม จากรูปจะเห็นว่ามียุทธศาสตร์ความเร็วลมอยู่ 3 ระดับ ที่แบ่งช่วงการทำงานของกังหันลมออกเป็น 4 ส่วน ความเร็วลมระดับแรก คือ ความเร็วลมคัทอิน (Cut-In Wind Speed) ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มทำงาน ระดับที่ 2 คือ ความเร็วพิกัด (Rated Wind Speed) จากภาพคือ ที่ความเร็วลม 15 m/s เป็นความเร็วลมที่ทำให้ กังหันลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้เต็มพิกัด สำหรับการทำงานในช่วงที่ 2 นั้น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะแปรผันตามความเร็วลมยกกำลังสาม และเป็นช่วงที่มีระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้ามากที่สุด ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่กังหันลมผลิตกำลังงานคงที่ที่พิกัด และระดับความเร็วลมสุดท้าย คือ ความเร็วลมคัทเอาท์ (Cut-Out Wind Speed) เป็นความเร็วลมสูงสุดที่กังหันลมทำงาน ถ้าความเร็วลมสูงกว่านี้ โรเตอร์จะหยุดทำงานเพื่อป้องกันใบพัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ อุปกรณ์อื่นๆ ไม่ให้ได้รับความเสียหาย

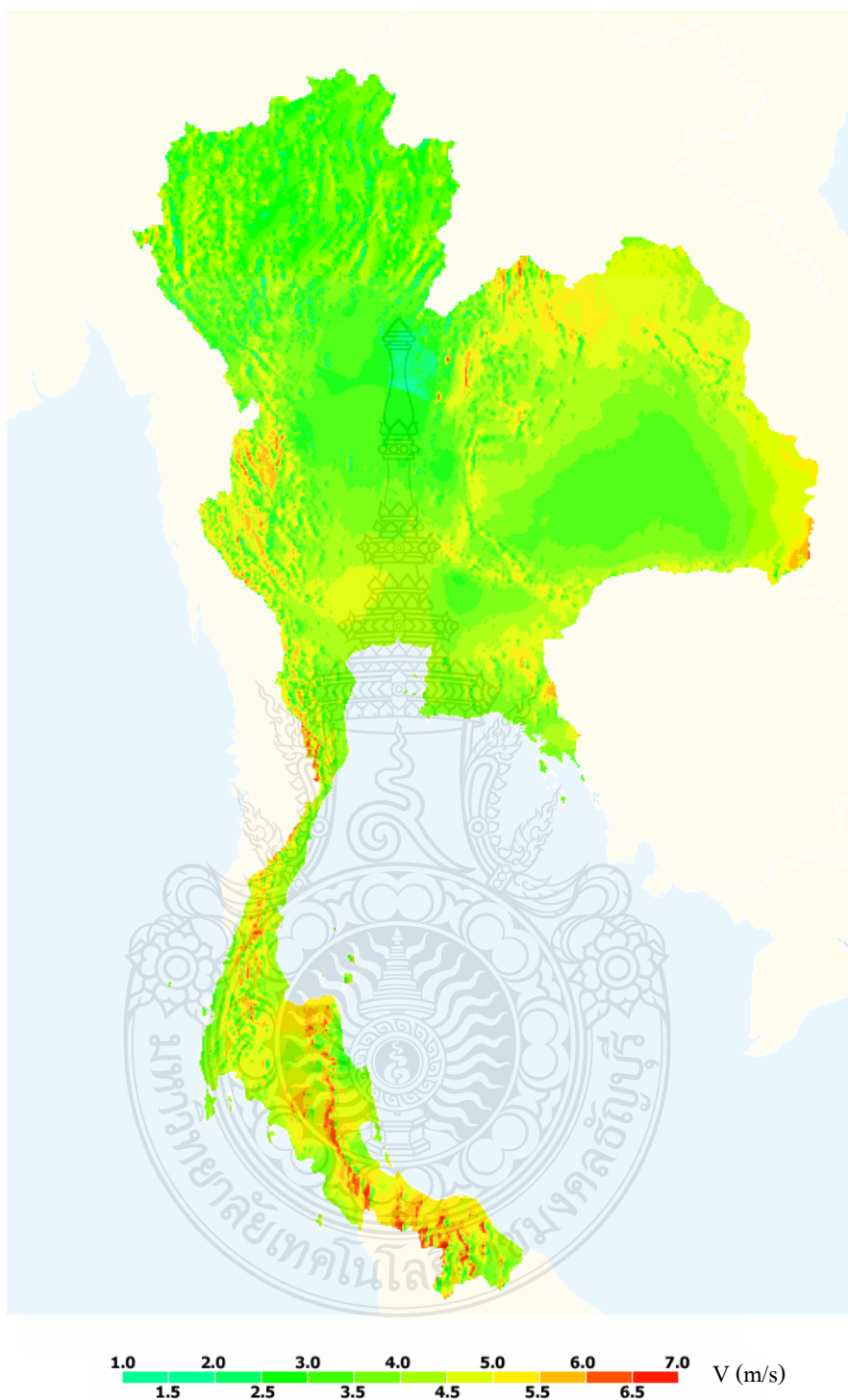


ภาพที่ 2.26 ตัวอย่างช่วงการทำงานของกังหันลม [14]

2.16 ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย

กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน ได้จัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทย โดยโครงการดังกล่าวใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางที่พัฒนาขึ้นโดยนักวิจัยของมหาวิทยาลัยคาร์ลสรูห์ ประเทศเยอรมัน (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model, KAMM) สำหรับคำนวณความเร็วลมในประเทศไทย โดยทำการจัดหาข้อมูลสถานะพื้นฐานของบรรยากาศพร้อมข้อมูลระดับความสูงและความหยابของพื้นที่ของประเทศไทย สำหรับใช้เป็นอินพุทของแบบจำลอง แล้วคำนวณความเร็วลมรายชั่วโมง ครอบคลุมช่วงระยะเวลา 15 ปี (พ.ศ. 2538-2552) โดยใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ แล้วนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยระยะยาวรายเดือนและรายปี ในการตรวจสอบรายละเอียดความถูกต้องของผลการคำนวณ จะนำค่าความเร็วลมที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง จากสถานีวัดลมของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ในแต่ละภูมิภาคของประเทศ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบพบว่า ความเร็วลมจากการคำนวณส่วนใหญ่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดจริง เมื่อพิจารณาแผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยรายปี ที่ความสูง 90 เมตร ซึ่งเป็นระดับความสูงของกังหันลมขนาดใหญ่ พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ มีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ โดยพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยรายปี 6-7 เมตร/วินาที จะอยู่บริเวณแนวภูเขาทางภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และด้านตะวันตกของภาคกลาง บริเวณที่มีสีเขียว [2] ดังแสดงในภาพที่ 2.27





ภาพที่ 2.27 แผนที่ศึกษาภาพพลังงานลมที่ระดับความสูง 90 เมตร [2]

2.17 คลาสของกึ่งหั่นลม

คณะกรรมการมาตรฐานเครื่องใช้ไฟฟ้านานาชาติ (International Electrotechnical Commission, IEC) ได้จัดคลาส (Classes) ของกึ่งหั่นลมตามความเร็วลม โดยแบ่งเป็น 4 Classes ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ตัวอย่าง เช่น Classes IV จะเป็นกึ่งหั่นลมที่ใช้สำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ย (V_{av}) 6 m/s หรือต่ำกว่า ที่มีความปั่นป่วนของลม (B_{15}) น้อยกว่า 0.16 ที่ความเร็วลม 15 m/s ซึ่งต้องสามารถทนต่อความรุนแรงและปั่นป่วนของลมที่ความเร็วลมอ้างอิง (V_{ref}) 30 m/s ได้เป็นระยะเวลา 10 นาที โดย A คือค่าที่ใช้ในการออกแบบที่มีความปั่นป่วนของลมสูง ส่วน B คือค่าที่ใช้ในการออกแบบที่มีความปั่นป่วนของลมต่ำ และ a คือ ค่าตัวแปรความชันในสมการความปั่นป่วนของลม

ตารางที่ 2.2 คลาสของกึ่งหั่นลม [15]

	Classes			
	I	II	III	IV
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	30
V_{av} (m/s)	10	8.5	7.5	6
A_{15}	0.18	0.18	0.18	0.18
a	2	2	2	2
B_{15}	0.16	0.16	0.16	0.16
a	3	3	3	3

2.18 ระบบควบคุมตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

ระบบควบคุมตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูล (Supervisory Control And Data Acquisition) หรือ SCADA เป็นระบบที่ใช้ในการรวบรวมและจัดการข้อมูล แสดงผลของการทำงานตรวจวัดรับ-ส่งข้อมูล และควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ สามารถควบคุมและแสดงผลข้อมูลระยะไกล ซึ่งนำเอาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์สมัยใหม่มาช่วยในการบริหารจัดการ โดยอาศัยโครงข่ายการสื่อสารและอุปกรณ์สื่อสารต่างๆ ในการติดต่อระหว่างศูนย์ควบคุมและสถานีสนาม เพื่อให้ศูนย์ควบคุมสามารถติดตามสถานะต่างๆ ที่เกิดขึ้น และควบคุมอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ที่สถานีสนามได้ตลอดเวลาอย่างถูกต้องและต่อเนื่อง โดยมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้คือ

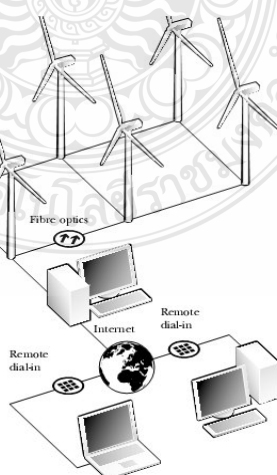
2.17.1 หน่วยควบคุมระยะไกล (Remote Terminal Unit) หรือ RTU เป็นส่วนหนึ่งของระบบ SCADA ที่ถูกติดตั้งอยู่ที่สถานีสนาม RTU จะต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุมและแสดงผล โดยจะติดต่อกับศูนย์ควบคุมผ่านระบบสื่อสาร

2.17.2 ระบบสื่อสาร (Communication System) ทำหน้าที่ในการสื่อสารเพื่อรับส่งข้อมูลหรือคำสั่งระหว่าง RTU หรือ ระหว่าง RTU กับศูนย์ควบคุมซึ่งระบบสื่อสารของระบบ SCADA สามารถใช้สื่อต่างๆ ในการสื่อสารเช่น วิทยุ ดาวเทียม หรือเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เป็นต้น การพิจารณาเลือกใช้ระบบสื่อสารต้องคำนึงถึง จำนวนข้อมูล ระยะทางที่ใช้ในการสื่อสาร รวมถึงภูมิประเทศและค่าใช้จ่าย

2.17.3 ศูนย์ควบคุม ทำหน้าที่ในการรับและจัดการข้อมูล รวมไปถึงการควบคุมระบบ โดยแบ่งเป็น

1) ศูนย์ควบคุมหลัก (Master Station) ทำหน้าที่เอาข้อมูลจาก RTU ทุกตัวในระบบ มาจัดเก็บและทำการประมวลผลเพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการต่างๆ หรือแสดงผลข้อมูลของ RTU แต่ละตัวให้เป็นไปตามที่ต้องการ นอกจากนั้นยังทำหน้าที่จัดการระบบการสื่อสารของระบบ SCADA เพื่อนำเอาข้อมูลของ RTU มาทำการประมวลผลตามเวลาที่กำหนด โดยศูนย์ควบคุมหลัก จะทำหน้าที่ในการจัดลำดับการเรียกถามข้อมูลจาก RTU แต่ละตัว หรือทำหน้าที่ในการรอรับข้อมูล ที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความผิดปกติของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ ซึ่งเป็นการรายงานทันที ที่เกิดเหตุการณ์ขึ้น โดยไม่ต้องรอให้เรียกถามข้อมูล

2) ศูนย์ควบคุมย่อย (Slave Station) เป็นสถานีลูกข่าย อยู่ภายใต้การควบคุมการปฏิบัติงานและรายงานข้อมูลของศูนย์ควบคุมหลัก เป็นสถานีที่ใช้ในการติดต่อและรับข้อมูลจากศูนย์ควบคุมหลัก ผ่านระบบสื่อสาร



ภาพที่ 2.28 ระบบ SCADA ของกังหันลม [16]

2.19 โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และมีบทบาทเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ทางด้านวิศวกรรม ซึ่งในหลักการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบคำนวณทางกลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) หรือ CFD ได้เข้ามามีบทบาทอย่างสำคัญ ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics)

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ซึ่งมีหน่วยประมวลผล (CPU) และหน่วยความจำ (Memory) ที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) และการทำงานของโปรแกรมการคำนวณของ CFD ทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สามารถวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ด้านกลศาสตร์ของไหลที่ไหลผ่านรูปทรงที่มีความยุ่งยากซับซ้อนได้ (Complexity of Geometry) หรือไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้านของไหลต่างๆ เช่น

- ของไหลที่สามารถอัดตัวได้ (Compressible Fluid) เช่น การวิเคราะห์การไหลในระบบท่อของระบบการทำความเย็นหรือปรับอากาศ
- ของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible Fluid) เช่น การไหลของน้ำในระบบท่อภายในอาคาร
- ของไหลที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar)
- ของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent)

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ CFD นั้น อาจจำแนกออกได้หลายชนิด เช่น สมการการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity Equation) หรือสมการอนุรักษ์พลังงานของมวลสาร (Conservation of Mass) สมการทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึง Momentum หรือที่รู้จักกันเป็นอย่างดีในทาง CFD คือ Navier-Stokes Equations สมการทั้งหมดที่กล่าวมา จะนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ของไหล ในโปรแกรมการคำนวณของ CFD โดยการจัดรวมกัน เป็นสมการที่เรียกว่า Non-Linear Partial Differential Equations (PDE) สำหรับใช้ในการวิเคราะห์การไหล ของของไหลแบบต่างๆ โดยปกติแล้วในการวิเคราะห์การไหล ของของไหลแบบต่างๆในทางวิศวกรรม จะคิดว่าการไหลนั้นเป็นแบบคงที่ต่อเนื่อง (Linear Flow) จึงสามารถตัดตัวแปรบางอย่างออกไปได้ ซึ่งในความเป็นจริงของไหลต่างๆ มีความซับซ้อนสูง เป็นการไหลแบบไม่ราบเรียบและไม่คงที่ตลอดเวลา (Non-Linear Flow) ซึ่งนั่นคือ ต้องใช้การวิเคราะห์ทางตัวเลขขั้นสูง (Advanced Numerical Methods) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การไหลของของไหลในปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริง การทำงานโดยทั่วๆ ไปของการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ใน CFD นั้น คือการใช้หลักการแทนที่ ของชุดสมการทางพีชคณิต

แก้ปัญหาตั้งแต่จุดเริ่มต้นของปัญหาในการไหล จนกระทั่งถึงจุดสุดท้ายของการวิเคราะห์ นั่นคือการหาคำตอบที่ต้องการ ซึ่งต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณ ทำให้ได้คำตอบโดยประมาณ (Approximate Solution) เมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์

หลักการแทนที่ (Discretization Method) ที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง และเป็นที่ยอมรับกันดีใน CFD แบ่งออกเป็น 2 วิธีการหลักๆ คือ

- Finite Difference Method (FDM)
- Finite Element Method (FEM)

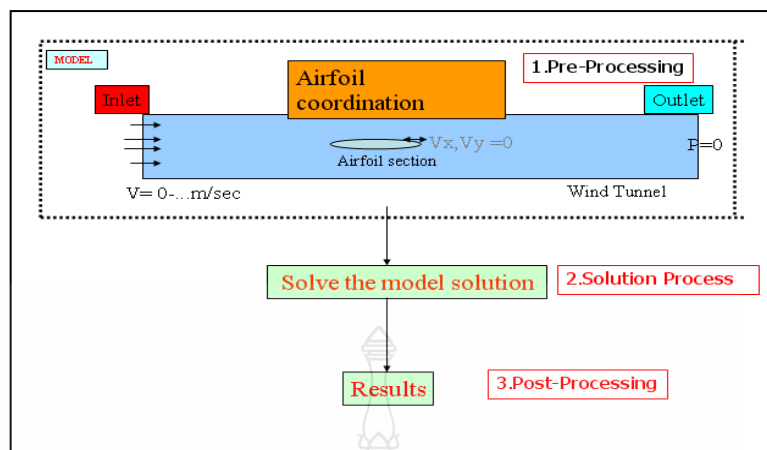
วิธีการ Finite Difference Method เป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุดในการวิเคราะห์ทาง CFD โดยจะเห็นได้จากซอฟต์แวร์ทั่วไปที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน ส่วนหลักๆ ของวิธีการวิเคราะห์ทาง CFD ของวิธีการนี้ คือการสร้างโดเมน (Domain) รวมถึงการสร้างส่วนของขอบเขตจำกัด (Boundary) ของปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ โดยการใช้กริด (Grid) หรือเมช (Mesh) ที่สร้างขึ้นมาให้สามารถทำการครอบคลุมปัญหาในการไหลได้ทั้งหมด แต่ละจุดย่อยๆ ของกริดจะถูกคำนวณและแทนที่ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Differential Equation เปรียบเทียบกับค่าที่เรียกว่า Finite Difference Approximation เพราะฉะนั้นค่าความแม่นยำที่ตรงของคำตอบจึงขึ้นอยู่กับขนาดของ Grid หรือ Mesh ที่สร้างขึ้นมา โดยทั่วไปยิ่งมีความละเอียดของ Mesh สูงก็จะทำให้คำตอบมีความแม่นยำสูงไปด้วย แต่ไม่ได้หมายความว่าอย่างนี้เสมอไป ในบางครั้งไม่จำเป็นต้องคำตอบในส่วนขององค์ประกอบต่างๆที่ไม่จำเป็น เนื่องจากทำให้เสียเวลาในการคำนวณ และไม่มีผลให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในงานที่ต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูง ก็ยังต้องมีการคำนึงถึงขอบเขตการทำงานต่างๆที่จำเป็น ในการแก้ปัญหาทางด้าน CFD นั้น ไม่ว่าจะทางด้านใดหรือใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ใดๆ มีขั้นตอนหลักๆ ดังนี้คือ [5]

- เตรียมข้อมูล (Pre-Processing) เป็นขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลในการวิเคราะห์ โดยกำหนดขอบเขตของงาน (Boundary Condition) คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) และแรงที่กระทำ (Load)

- การประมวลผล (Solution-Processing) เพื่อหาคำตอบหรือผลเฉลย

- การแสดงผล (Post-Processing) เป็นการแสดงผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ ในรูปแบบชิ้นงาน กราฟหรือการแสดงค่าเป็นตัวเลข

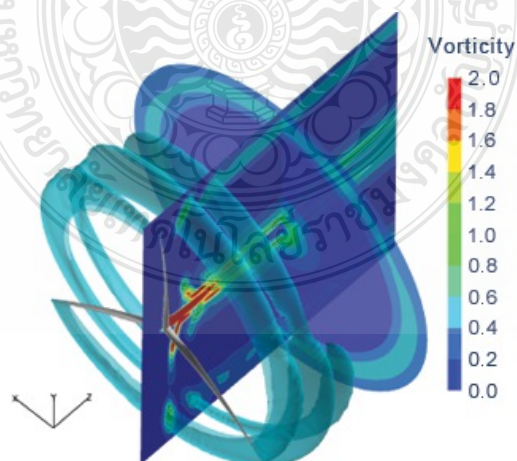
สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ไปกั้นในอุโมงค์ลม ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะการทำงานของโปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 ลักษณะขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ใบกังหันในอุโมงค์ลม [5]

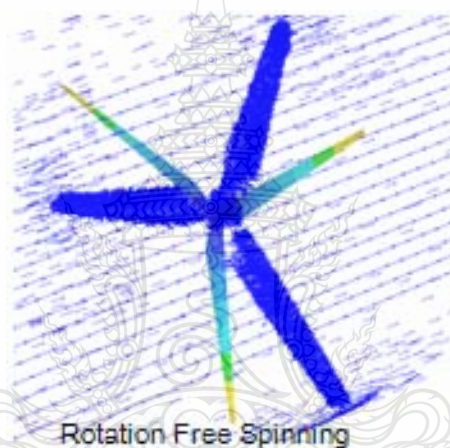
2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บริษัทผู้ผลิตใบกังหันลม [17] ใช้โปรแกรม CFD ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของแพนอากาศ (Air Foil) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบของกังหันลม และช่วยในการทำความเข้าใจหลักการทางฟิสิกส์ของ Air Foil ใช้วิเคราะห์และประมาณการค่าพลังงานที่กังหันสามารถผลิตได้ (AEP) ช่วยให้มองเห็นภาพการไหลของอากาศที่ไหลผ่านใบกังหัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์การไหลของอากาศกับใบกังหันตามหลักอากาศพลศาสตร์ และใช้ CFD ในการทดสอบสมมติฐานตามที่ตั้งไว้ เพื่อช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบ



ภาพที่ 2.30 การใช้ CFD วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันของบริษัทผู้ผลิตใบกังหันลม [17]

สว่าง ชาติทอง [18] ได้ศึกษาการออกแบบระบบทางกลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ โดยใช้ผลจากการวิเคราะห์ระบบทางกล มาผนวกเข้ากับผลการออกแบบใบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ด้วยการใช้ผลการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล ด้วยโปรแกรม CFDesign V 8.0 ในการออกแบบระบบทางกลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความเร็วลมเริ่มต้นที่ 2.5 m/s และมีกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด 20 kW ที่ความเร็วลม 9 m/s โดยการออกแบบใบกังหันลมให้มีมุมบิดที่โคนใบ 8 องศา และที่ปลายใบบิด 2 องศา ซึ่งผลจากการวิเคราะห์การออกแบบระบบทางกลของกังหันลมผลิตไฟฟ้าดังกล่าว กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่ำได้ดียิ่งขึ้น เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยในช่วง 4-5 m/s



ภาพที่ 2.31 การวิเคราะห์ใบกังหันด้วยโปรแกรม CFDesign V 8.0 [18]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลม ในการผลิตพลังงานจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW เป็นการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบ 1 ปี (Annual Energy Production, AEP) จากขนาดความยาวใบที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งประยุกต์เข้ากับการทำงานจริงของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW การวิเคราะห์จะทำการจำลองขนาดความยาวใบให้มีขนาดเพิ่มขึ้นและลดลง เป็นการเปลี่ยนขนาดพื้นที่กวาด (Swept Area) ในการรับพลังงานลมของใบกังหันลม โดยจะทำการทดสอบกับใบของกังหันลม 3 ขนาด ที่มีขนาดความยาวใบที่แตกต่างกัน คือ 35 m, 37.5 m และ 40 m ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 72 m, 77 m และ 82 m ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD จะทำการย่อส่วนใบกังหันลมลงมา ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 10 จากขนาดความยาวใบปกติที่ 37.5 m มาเป็นขนาดความยาวใบ 3.75 m ย่อส่วนขนาดความยาวใบที่เพิ่มขึ้นจากขนาด 40 m มาเป็นขนาดความยาว 4.0 m และย่อส่วนขนาดความยาวใบที่ลดลง จากขนาด 35 m มาเป็นขนาดความยาว 3.5 m แล้วทำการหาค่าพลังงานที่ได้จากใบกังหันลมแต่ละขนาด โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมของอำเภอหัวไทร ที่ทำการเก็บบันทึกในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึงเดือนมิถุนายน 2553 คำนวณและเปรียบเทียบค่าปริมาณพลังงานที่กังหันลมสามารถผลิตได้ในรอบ 1 ปี

โดยมีรายละเอียดทางเทคนิคของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ (Diameter)	77	m
พื้นที่กวาดของใบ (Swept Area)	4,657	m ²
จำนวนใบ	3	ใบ
ความเร็วลมเริ่มผลิตไฟฟ้า (Cut-in Wind Speed)	3	m/s
ความเร็วลมหยุดทำงาน (Cut-out Wind Speed)	21	m/s
ความเร็วลมที่ผลิตกำลังงานสูงสุด (Rated Wind Speed)	11.5	m/s
ความสูงของคอกังหัน (Hub Height)	80	m
ประเภทเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	Doubly-Fed Induction Generator	
รูปแบบการเชื่อมต่อ	Asynchronous	



ภาพที่ 3.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW

3.1 การเก็บบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลลม

ข้อมูลลมและข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม จะถูกเก็บบันทึกโดยระบบ SCADA ซึ่งทำการบันทึกข้อมูลที่สำคัญต่างๆ ของกังหันลม ลงในฐานข้อมูลของระบบ โดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วลมและทิศทางลม ติดตั้งอยู่ด้านบนของห้องเครื่อง ที่ระดับความสูง 80 m ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วลมและทิศทางลมบนห้องเครื่อง

ตารางที่ 3.1 เป็นการแสดงจำนวนชั่วโมงการเกิดลม ที่ความเร็วลมต่างๆ ในแต่ละเดือนที่ได้ จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วลมบนห้องเครื่อง และบันทึกเก็บไว้ในฐานข้อมูลของระบบ SCADA สำหรับจำนวนชั่วโมงการเกิดลมที่แสดงในตารางนี้ จะนำไปใช้สำหรับคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณ พลังงานที่กังหันลมควรผลิตได้ เมื่อกังหันลมสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 3.1 จำนวนชั่วโมงการเกิดลมที่ความเร็วลมต่างๆ ในแต่ละเดือน

V (m/s)	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
	2552	2552	2552	2552	2552	2552	2553	2553	2553	2553	2553	2553
3	70.3	53.6	38.6	78.3	68.1	36.2	51.6	69.5	84.1	114.5	112.8	81.4
4	92.6	87.6	63.1	108.3	98.4	73.7	105.0	141.3	132.4	143.5	146.2	117.0
5	114.3	97.8	94.0	140.7	81.2	134.8	110.0	160.2	121.0	123.5	138.5	133.9
6	119.2	95.7	127.7	122.0	53.8	147.2	106.2	118.7	65.8	76.9	89.9	103.8
7	92.6	94.2	108.8	78.2	24.0	104.0	121.7	63.1	44.4	35.8	35.8	90.5
8	62.9	58.7	57.0	39.4	20.4	61.7	99.3	15.5	24.7	14.0	8.4	52.1
9	38.5	35.6	33.5	17.4	17.8	47.7	51.6	5.0	29.6	2.7	1.9	23.0
10	20.8	26.5	21.0	10.5	17.8	27.5	12.6	0.7	23.2	0.7	1.0	10.5
11	8.6	18.7	14.8	6.7	14.8	11.4	3.3	0	17.9	0.1	0	3.8
12	2.4	10.9	10.0	3.1	3.8	5.7	1.0	0	6.9	0.1	0.5	1.4
13	0.7	2.9	4.1	2.1	0.4	2.6	0	0	0.5	0	0	0.5
14	0	1.0	1.4	0.7	0	0.9	0	0	0	0	0	0.5
15	0.1	0.1	0.5	0.1	0	0.4	0	0	0	0	0	0
16	0	0.1	0.4	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กักหั่นผลิตได้

การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กักหั่นผลิตได้ จะทำการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่กักหั่นผลิตได้ในรอบ 1 ปี (Annual Energy Production) หรือ AEP โดยจะแยกวิเคราะห์ ดังนี้คือ

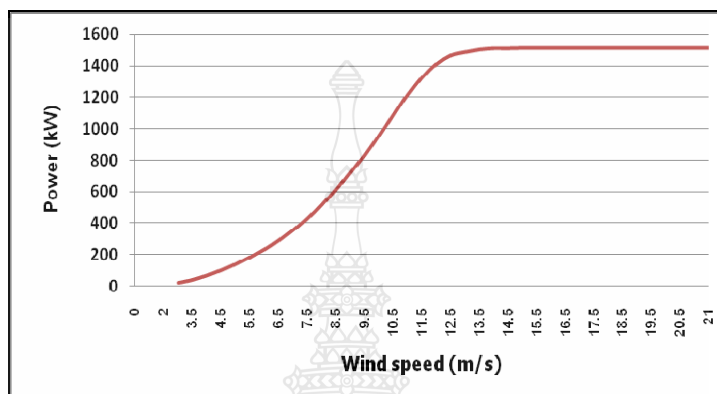
3.2.1 ปริมาณพลังงานที่กักหั่นผลิตจริง จะวิเคราะห์จากข้อมูลที่ได้จากการเก็บบันทึกค่าด้วยระบบ SCADA จากการทำงานจริงของกักหั่นลม

3.2.2 ปริมาณพลังงานที่กักหั่นลมทำงานได้อย่างเต็มที่และต่อเนื่อง หรือที่ควรผลิตได้โดยไม่หยุดเดินเครื่อง ซึ่งจะนำไปใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบกับปริมาณพลังงานที่ได้จากใบกักหั่นจำลองที่วิเคราะห์ด้วย CFD โดยปริมาณพลังงานที่กักหั่นลมควรผลิตได้ จะคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั่วโมงการเกิดลมที่ความเร็วลมต่างๆ ในแต่ละเดือน ตามตารางที่ 3.1 กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกักหั่นลมที่ความเร็วลมนั้นๆ ตามตารางที่ 3.2 ซึ่งตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก

ตารางที่ 3.2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่กักหั่นลมผลิตได้ที่ความเร็วลมต่างๆ

ความเร็วลม (m/s)	กำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)
3	24.75
4	71.2
5	142.46
6	235.8
7	357.22
8	517.29
9	720.87
10	955.91
11	1,216.59
12	1,409.59
13	1,484.28
14	1,507.66
15	1,510
16-20	1,510
21	0

สำหรับค่าในตารางที่ 3.2 เป็นค่าเฉลี่ยกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากการทำงานจริงของกังหันลม ที่ความเร็วลมต่างๆ ที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลของระบบ รายละเอียดดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข สำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณหาปริมาณพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเมื่อนำค่าในตารางมาพล็อตกราฟจะได้กราฟสมรรถนะกำลัง (Power Curve) การทำงานจริงของกังหันลม ดังแสดงในภาพที่ 3.3



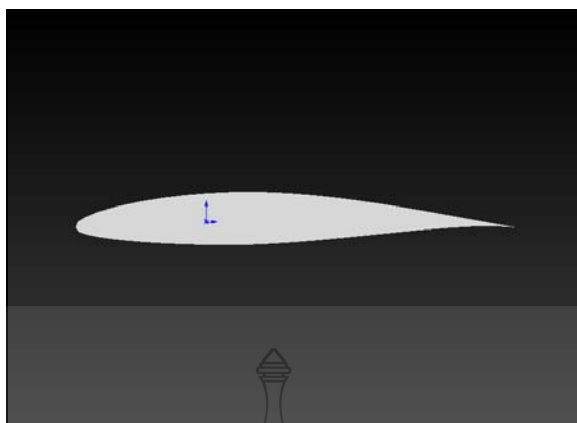
ภาพที่ 3.3 สมรรถนะกำลัง (Power Curve) ตามการทำงานจริงของกังหันลม

3.3 การวิเคราะห์กำลังงานจากใบกังหันลมด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CFDesign V.8 วิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันลมที่ทำการจำลองขึ้น ซึ่งการจำลองรูปแบบใบของกังหันลมจะทำการจำลองจากโปรแกรมการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Aided Design, CAD) โดยทำการจำลองให้มีขนาดความยาวที่แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 3.5 m, 3.75 m และ 4 m รูปแบบโปรไฟล์ใบจำลองที่ใช้สำหรับการศึกษานี้จะใช้รูปแบบโปรไฟล์ใบของ NACA โดยใช้แอร์ฟอยล์ NACA 64₁-412 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยจะกำหนดให้จุด Origin อยู่ในตำแหน่งหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคอร์ด (Chord) จากส่วนหัวของใบกังหัน และทำการทดสอบในอุโมงค์ลมด้วยโปรแกรม CFD โดยให้อากาศไหลผ่านแอร์ฟอยล์ที่ความเร็วลมต่างๆ ในช่วงระหว่าง 3-14 m/s โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.3.1 กำหนดข้อมูลและตัวแปรต่างๆ

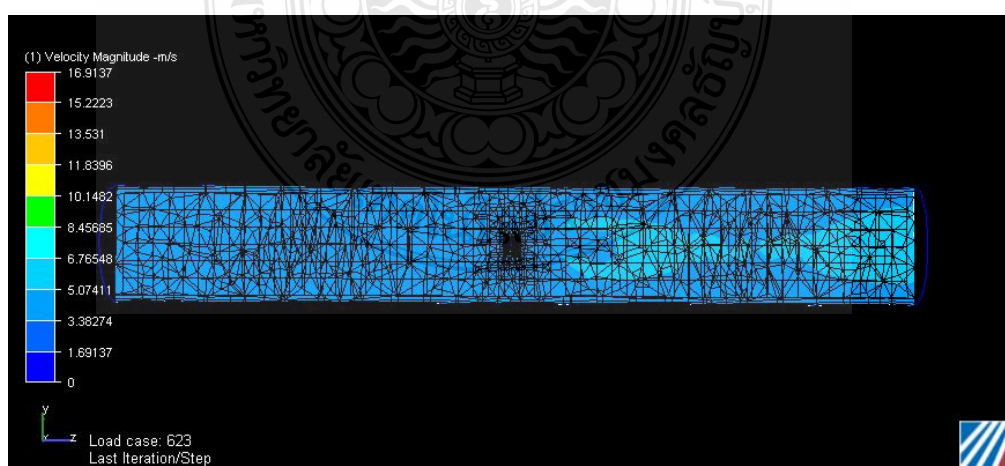
- 1) กำหนดความเร็วลมทางเข้าอุโมงค์ลม
- 2) กำหนดความดันทางออกจากอุโมงค์ลมให้เท่ากับศูนย์ความดันเกจ
- 3) กำหนดให้อากาศเป็นการไหลแบบคงที่ และเป็นของไหลชนิดอัดตัวไม่ได้
- 4) ตั้งค่าเมช (Mesh) ให้ปรับขนาดแบบอัตโนมัติ
- 5) กำหนดค่าการวิเคราะห์ (Iteration) ขึ้นต่ำ 1000 step



ภาพที่ 3.4 หน้าตัดของแอร์ฟอยล์ NACA 64₁-412



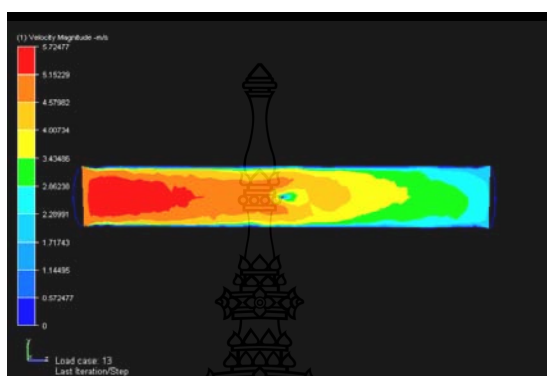
ภาพที่ 3.5 รูปแบบใบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของ Mesh ในการวิเคราะห์

3.3.2 วิเคราะห์และประมวลผล

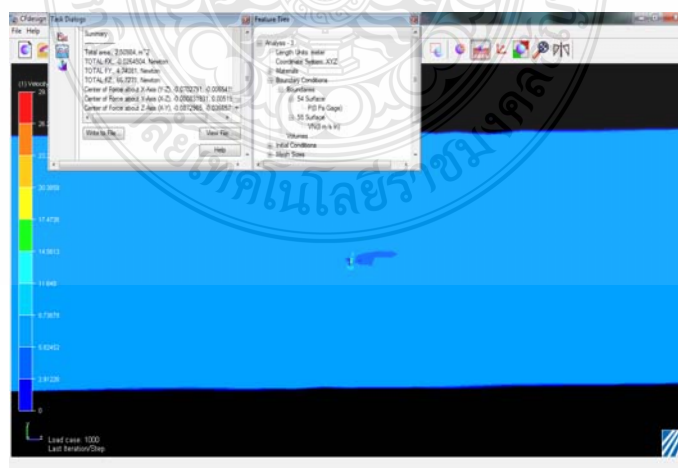
การวิเคราะห์ของโปรแกรม แสดงดังภาพที่ 3.7 จากภาพโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์และคำนวณค่าแรงที่กระทำกับใบกังหันเมื่อมีลมเข้าปะทะกับใบกังหันลม โดยจะทำการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันตามค่าตัวแปรที่ได้กำหนดไว้



ภาพที่ 3.7 การวิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันด้วยโปรแกรม CFD

3.3.3 แสดงผลและให้คำตอบ

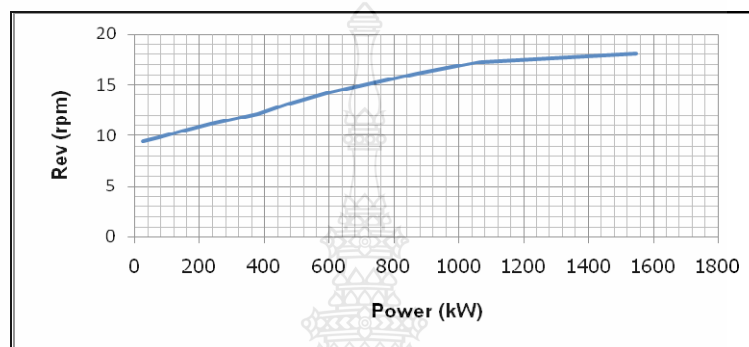
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงผลของแรงที่กระทำกับใบกังหันลม จากภาพที่ 3.8 เป็นตัวอย่าง ของแรงที่เกิดขึ้นกับใบกังหันความยาว 3.5 m โดยความเร็วลม (VN) ที่ใช้ทดสอบ คือ 8 m/s ได้ผลของแรงที่กระทำตามแนวแกน Y หรือ F_y เท่ากับ 4.74 N และแรงที่กระทำตามแนวแกน Z หรือ F_z เท่ากับ 66.73 N



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันความยาว 3.5 m

3.4 การคำนวณหากำลังงานที่ได้จากใบกังหันลม

3.4.1 คำนวณหาหามุมความเร็วลมสัมพันธ์ ในการคำนวณจะประยุกต์เข้ากับการทำงานจริงของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW โดยการนำ Power Curve ของกังหันลม มาวิเคราะห์ร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต (ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต) ดังแสดงในภาพที่ 3.9 เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วเชิงมุม



ภาพที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต

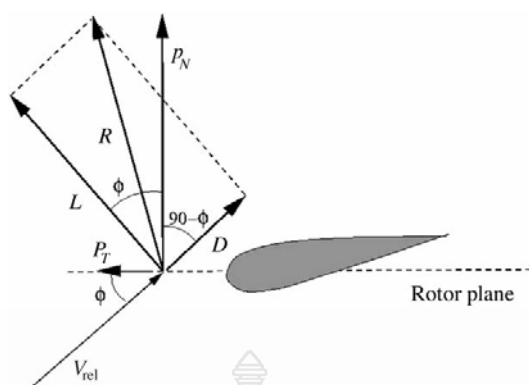
จากทฤษฎีของ Betz กังหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อค่าการสูญเสียในแนวแกน (a) มีค่าเท่ากับ $1/3$ และเมื่อไม่คิดค่าการสูญเสียในแนวรัศมี (a') เนื่องจากไม่มีการคองของอากาศ (Wake Rotation) ดังนั้นจากสมการที่ 2.28 เมื่อพิจารณาให้กังหันลมทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุด สามารถคำนวณหาหามุมความเร็วลมสัมพันธ์ได้จากสมการ

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2V_0}{3r\Omega} \quad (3.1)$$

และความเร็วลมสัมพันธ์

$$U_{rel} = \sqrt{\left(\frac{2V_0}{3}\right)^2 + (r\Omega)^2} \quad (3.2)$$

3.4.2 หาค่าแรงยก (L) และแรงจุด (D) ค่าแรงยก และแรงจุด ของแอร์ฟอยล์ปกติจะได้ออกจากการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งอาจต้องใช้ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายที่สูง แต่สำหรับงานวิจัยนี้ค่าแรงยกและแรงจุด จะได้ออกจากการคำนวณซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD ที่ความเร็วลมต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 3.10 แรงที่เกิดกับใบกังหันลม [19]

พิจารณาแรงจากเวกเตอร์ตามภาพที่ 3.10 จะได้ความสัมพันธ์ ซึ่งใช้กำหนดทิศทางในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD คือ

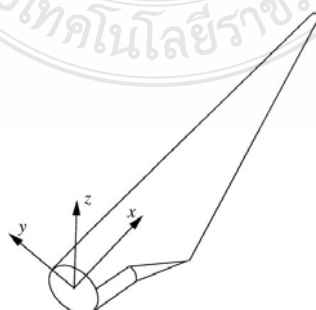
$$P_T = F_Y = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (3.3)$$

$$P_N = F_Z = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (3.4)$$

สามารถหาค่าแรงยก (L) และแรงจุด (D) ได้จากการแก้สมการที่ 3.3 และ 3.4 โดยการศึกษานี้ จะทำการวิเคราะห์ค่าแรงที่กระทำกับใบกังหันในลักษณะสองมิติ คือแรงที่กระทำในแนวแกน Y และแรงที่กระทำในแนวแกน Z ส่วนแรงที่กระทำตามความยาวใบหรือในแนวแกน X จะไม่นำมาพิจารณา

โดย F_Y คือ แรงจากการวิเคราะห์ด้วย CFD ที่กระทำกับใบในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม

F_Z คือ แรงจากการวิเคราะห์ด้วย CFD ที่กระทำกับใบในแนวเดียวกับทิศทางลม



ภาพที่ 3.11 ทิศทางแนวแกนของแรงที่กระทำกับใบกังหัน [19]

ค่าของแรงยกและแรงดูด สามารถแสดงอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) และสัมประสิทธิ์แรงดูด (C_D) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ ดังนี้

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A_b U_{rel}^2} \quad (3.5)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A_b U_{rel}^2} \quad (3.6)$$

เมื่อ

- C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก
- C_D = สัมประสิทธิ์แรงดูด
- L = แรงยก [N]
- D = แรงดูด [N]
- ρ = ความหนาแน่นของอากาศ [kg/m^3]
- A_b = พื้นที่ระนาบของแพนอากาศ [m^2]
- U_{rel} = ความเร็วลมสัมพัทธ์ [m/s]

3.4.3 กำหนดหาค่ากำลังงานจากใบกังหันลม โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$P = \frac{1}{2} \rho A_b u^3 (\cot \phi)(1 + \cot^2 \phi)(C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) B \quad (3.7)$$

เมื่อ

- P = กำลังงานจากกังหันลม [Watt]
- C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก
- C_D = สัมประสิทธิ์แรงดูด
- ρ = ความหนาแน่นของอากาศ [kg/m^3]
- A_b = พื้นที่ระนาบของแพนอากาศ [m^2]
- u = ความเร็วลมที่ใบกังหัน [m/s^2]
- ϕ = มุมความเร็วลมสัมพัทธ์
- B = จำนวนใบกังหันลม

กำลังงานที่ได้จากสมการที่ 3.8 เป็นกำลังงานทางกลที่ได้จากใบกังหัน ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังทางไฟฟ้าสุทธิ และสามารถเปรียบเทียบค่า AEP ได้ ต้องคูณด้วยประสิทธิภาพของชุดเกียร์ และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยให้ประสิทธิภาพทางกลของชุดเกียร์ และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เท่ากับ 0.95 เท่ากันที่ทุกความเร็วลม ซึ่งจะได้กำลังงานทางไฟฟ้าสุทธิ คือ

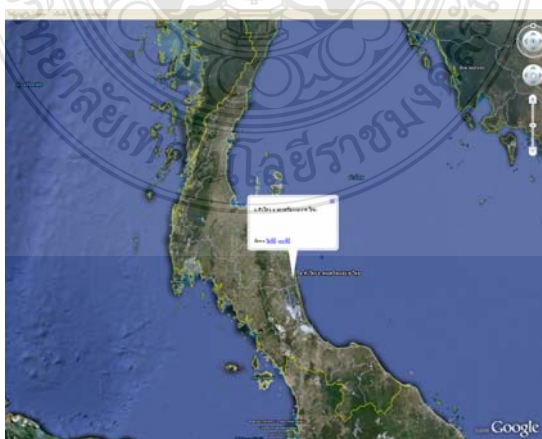
$$P_{net} = \eta_m \eta_e P \quad (3.8)$$

$$P_{net} = 0.95 \times 0.95 \times P \quad (3.9)$$

เมื่อ P_{net} = กำลังไฟฟ้าสุทธิ [Watt]
 P = กำลังงานจากใบกังหันลม [Watt]
 η_m = ประสิทธิภาพทางกลของเกียร์ทดรอบ
 η_e = ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.5 สถานที่ตั้งกังหันลมในการศึกษาวิจัย

กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ติดตั้งอยู่บนพื้นที่ 23 ไร่ บ้านทะเลปิ้ง ตำบลหัวไทร อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช ผลิตและจ่ายไฟฟ้าเชื่อมกับระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดำเนินการโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน โดยเริ่มเดินเครื่อง เมื่อวันที่ 8 มิถุนายน 2552



ภาพที่ 3.12 แผนที่ตั้งโครงการ



ภาพที่ 3.13 สถานที่ติดตั้งกังหันลม

3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากใบกังหันลม

การวิเคราะห์เปรียบเทียบพลังงานจากใบกังหันลมจะทำการเปรียบเทียบค่า AEP ที่ได้จากขนาดใบของกังหันลมทั้งสามขนาด เพื่อศึกษาว่าขนาดใบของกังหันลมที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า AEP มากน้อยเพียงใด โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

3.6.1 เก็บรวบรวมข้อมูลลมและการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมจากฐานข้อมูลของระบบ SCADA ที่ได้ทำการเก็บบันทึก ในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึง เดือน มิถุนายน 2553

3.6.2 วิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จริง และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้ในรอบหนึ่งปี เมื่อสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

3.6.3 จำลองใบกังหันลม และทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD เพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังงานจากใบกังหันลม ในช่วงความเร็วลม 3-14 m/s

3.6.4 คำนวณหาค่า AEP ที่ได้จากใบจริงและใบจำลอง เพื่อเปรียบเทียบค่า AEP ในการผลิตไฟฟ้าจากใบกังหันลมขนาดปกติ ที่มีความยาว 37.5 m

3.6.5 คำนวณค่า AEP ที่ได้จากใบจำลองทั้งสามขนาด เพื่อเปรียบเทียบค่า AEP จากผลของความยาวใบที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 3.14 แผนผังลำดับขั้นตอนการศึกษาวิจัย

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

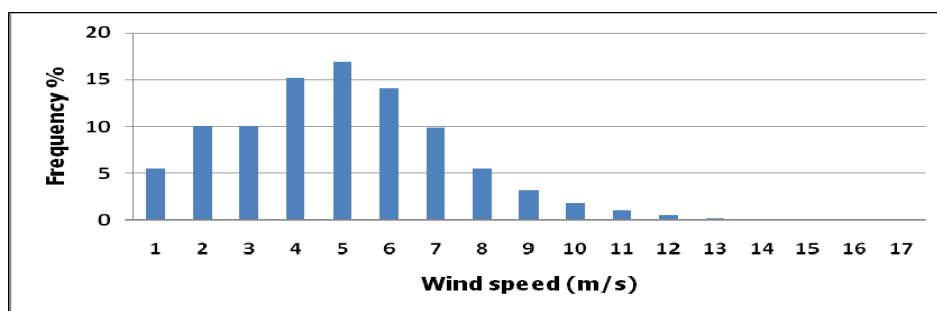
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลลม

จากข้อมูลลมที่ทำการเก็บบันทึก ช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึงเดือนมิถุนายน 2553 เมื่อนำข้อมูลลมมาวิเคราะห์ พบว่ามีความเร็วลมเฉลี่ยรายปี อยู่ที่ 4.79 m/s ดังแสดงตามตารางที่ 4.1 เดือนที่มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงเกินกว่า 5 m/s มีทั้งหมด 6 เดือน คือ เดือนกรกฎาคม, เดือนสิงหาคม เดือนกันยายน, เดือนธันวาคม, เดือนมกราคม และเดือนมิถุนายน โดยเดือนที่มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุด คือเดือนธันวาคม 2552 มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 5.70 m/s

ตารางที่ 4.1 ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน

เดือน / ปี	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)
กรกฎาคม 2552	5.35
สิงหาคม 2552	5.34
กันยายน 2552	5.57
ตุลาคม 2552	4.83
พฤศจิกายน 2552	3.43
ธันวาคม 2552	5.70
มกราคม 2553	5.62
กุมภาพันธ์ 2553	4.50
มีนาคม 2553	4.53
เมษายน 2553	3.77
พฤษภาคม 2553	3.81
มิถุนายน 2553	5.05
เฉลี่ย	4.79

การแจกแจงความถี่ของความเร็วลม ดังแสดงในภาพที่ 4.1 เป็นเปอร์เซ็นต์ความถี่ในการเกิดลมที่ความเร็วลมต่างๆ โดยความถี่การเกิดลมส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความเร็วลมระหว่าง 4-6 m/s



ภาพที่ 4.1 เเปอร์เซ็นต์ความถี่การกระจายตัวของความเร็วลม

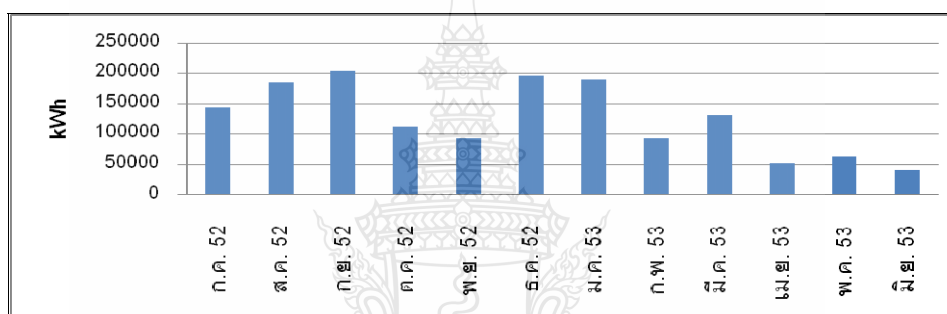
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตจริง

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตจริงจากการบันทึกค่า ในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึงเดือนมิถุนายน 2553 แสดงตามตารางที่ 4.2 โดยเดือนที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดคือเดือนกันยายน 2552 สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 204,128 kWh

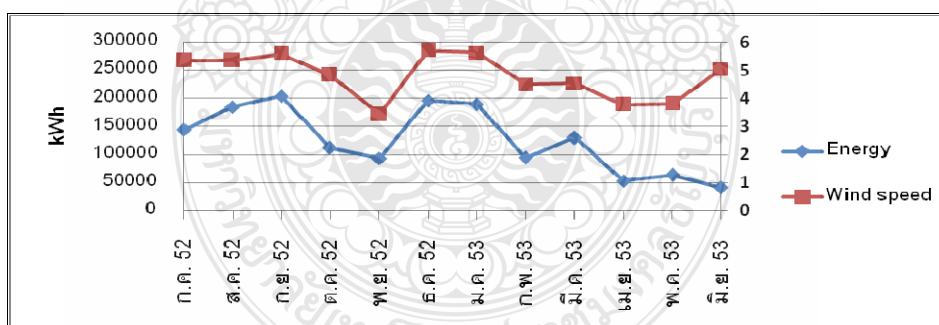
ตารางที่ 4.2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตจริงในแต่ละเดือน

เดือน / ปี	พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ (kWh)
กรกฎาคม 2552	144,029
สิงหาคม 2552	184,720
กันยายน 2552	204,128
ตุลาคม 2552	111,694
พฤศจิกายน 2552	93,356
ธันวาคม 2552	196,143
มกราคม 2553	189,742
กุมภาพันธ์ 2553	93,925
มีนาคม 2553	129,839
เมษายน 2553	53,015
พฤษภาคม 2553	63,955
มิถุนายน 2553	40,956
AEP	1,505,502

จากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ 1,505,502 kWh ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว เมื่อนำมาคำนวณหาค่า CF จะได้ค่า CF เท่ากับ 11.46% และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้กับความเร็วมเฉลี่ย พบว่าการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม มีความสอดคล้องกับความเร็วมเฉลี่ยในแต่ละเดือน ดังแสดงในภาพที่ 4.3 สำหรับเดือนที่ผลิตไฟฟ้า ได้น้อยที่สุด คือเดือนมิถุนายน 2553 ผลิตไฟฟ้าได้ 40,956 kWh โดยมีความเร็วมเฉลี่ยอยู่ที่ 5.05 m/s ซึ่งได้ปริมาณไฟฟ้าต่ำกว่าที่ควรจะเป็นมาก เนื่องจากการหยุดเดินเครื่องเพราะระบบกังหันลม เกิดความขัดข้อง และในบางเดือนที่มีการปรับปรุงระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหรือมีเหตุ ให้ไม่สามารถเดินเครื่องได้ทำให้สูญเสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อค่า AEP และค่า CF ที่ได้



ภาพที่ 4.2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตจริงในแต่ละเดือน



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้กับความเร็วมเฉลี่ย

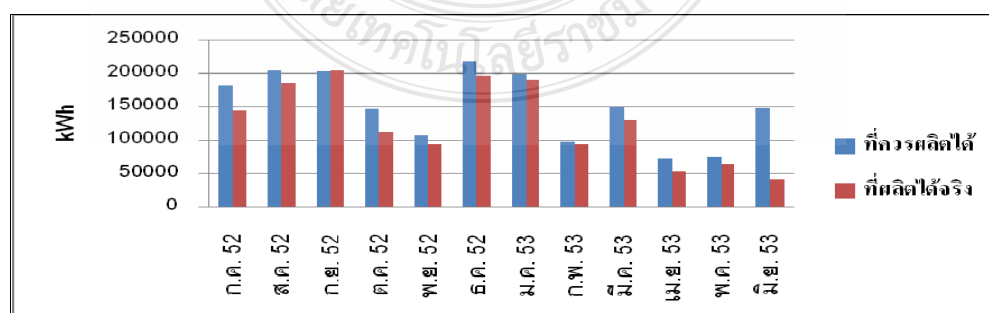
4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้

เมื่อนำค่า Power curve ตามการทำงานจริงของกังหันลม มาคำนวณกับจำนวนชั่วโมง การเกิดลมในแต่ละเดือน ปริมาณพลังงานที่กังหันลมควรผลิตได้ หรือสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จะมีค่า AEP เท่ากับ 1,797,118 kWh ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้

เดือน / ปี	พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้ (kWh)
กรกฎาคม 2552	181,012
สิงหาคม 2552	203,432
กันยายน 2552	203,070
ตุลาคม 2552	146,252
พฤศจิกายน 2552	105,829
ธันวาคม 2552	218,182
มกราคม 2553	199,031
กุมภาพันธ์ 2553	97,451
มีนาคม 2553	148,789
เมษายน 2553	71,820
พฤษภาคม 2553	74,332
มิถุนายน 2553	147,918
AEP	1,797,118

ปริมาณพลังงานที่กังหันลมควรผลิตได้ เมื่อคำนวณตามข้อมูลความเร็วลม เดือนที่ผลิตพลังงานได้สูงสุด คือเดือนธันวาคม 2552 ซึ่งควรจะผลิตได้ 218,182 kWh สอดคล้องกับความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน ซึ่งเดือนธันวาคม 2552 มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดเช่นกัน โดยมีความเร็วลมเฉลี่ย 5.7 m/s ภาพที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง ปริมาณพลังงานที่กังหันลมผลิตจริงกับปริมาณพลังงานที่กังหันลมควรผลิตได้ ซึ่งมีเพียงเดือนกันยายน 2552 ที่สามารถผลิตได้ตามที่ควรจะเป็น



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่กังหันลมผลิตจริงกับปริมาณพลังงานที่ควรผลิตได้

4.4 ผลของแรงที่กระทำกับใบกังหันลมจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD

การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD จะทำการวิเคราะห์หาค่าแรงที่กระทำกับใบกังหันลม 3 ขนาด ที่มีความยาวใบ 3.5 m, 3.75 m และ 4 m จากการย่อขนาดลงมา โดยวิเคราะห์หาแรงที่กระทำกับใบกังหันที่ทุกๆ ความเร็วลม ตั้งแต่ความเร็วลม 3 m/s ถึง 14 m/s ซึ่งผลของการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันในแนวแกน Y และแรงที่กระทำในแนวแกน Z ทำให้ได้ค่าแรงยก แรงดูด สัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์แรงดูด ตามขนาดความยาวใบกังหันลม ดังแสดงในตารางที่ 4.4 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ จากผลที่ได้ พบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น แรงที่กระทำกับใบกังหันลมในแนวแกน Y และแรงที่กระทำในแนวแกน Z มีค่าเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับค่าแรงยก (L) และแรงดูด (D) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) และค่าสัมประสิทธิ์แรงดูด (C_D) มีผลไม่มากนัก เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น

โดย F_Y คือ แรงจากการวิเคราะห์ด้วย CFD ที่กระทำกับใบในแนวตั้งฉากกับทิศทางลม

F_Z คือ แรงจากการวิเคราะห์ด้วย CFD ที่กระทำกับใบในแนวเดียวกับทิศทางลม

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ใบกังหันลมด้วยโปรแกรม CFD ความยาวใบ 3.5 m

ความเร็วลม (m/s)	F_Y (N)	F_Z (N)	L (N)	D (N)	C_L	C_D
3	0.13	8.94	8.94	0.39	1.912	0.083
4	0.54	16.79	16.79	0.70	2.308	0.096
5	1.41	25.10	25.12	0.88	2.317	0.081
6	2.25	38.33	38.38	1.48	2.620	0.101
7	3.48	51.20	51.26	1.91	2.679	0.099
8	4.74	66.73	66.86	2.50	2.700	0.101
9	5.47	78.12	78.27	3.00	2.626	0.101
10	7.59	91.11	91.39	2.48	2.329	0.063
11	9.57	127.52	127.77	4.64	2.573	0.093
12	12.65	151.04	151.43	5.56	2.683	0.099
13	15.91	173.03	173.55	6.70	2.642	0.102
14	18.76	206.32	206.95	10.32	2.770	0.138

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ไปก้งหันลมด้วยโปรแกรม CFD ความยาวใบ 3.75 m

ความเร็วลม (m/s)	F_Y (N)	F_Z (N)	L (N)	D (N)	C_L	C_D
3	0.14	11.27	11.26	0.47	2.079	0.087
4	0.49	20.27	20.25	0.91	2.213	0.099
5	1.30	31.18	31.19	1.36	2.390	0.104
6	2.20	42.30	42.32	1.66	2.213	0.087
7	3.35	62.90	62.64	2.83	2.538	0.114
8	4.48	81.29	61.32	3.75	2.579	0.119
9	5.43	98.45	98.48	4.54	2.436	0.112
10	6.67	125.33	132.76	6.48	2.639	0.129
11	8.03	160.22	160.14	8.51	2.681	0.142
12	10.83	185.43	185.39	10.18	2.708	0.149
13	13.05	225.21	225.02	14.50	2.877	0.185
14	15.03	257.24	257.09	18.82	2.884	0.211

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ไปก้งหันลมด้วยโปรแกรม CFD ความยาวใบ 4.0 m

ความเร็วลม (m/s)	F_Y (N)	F_Z (N)	L (N)	D (N)	C_L	C_D
3	0.21	12.45	12.44	0.41	1.253	0.041
4	0.59	21.52	21.51	0.81	1.707	0.064
5	1.36	37.38	37.37	1.60	2.249	0.096
6	2.04	50.23	50.24	2.24	2.239	0.099
7	3.21	74.33	74.29	3.64	2.552	0.125
8	4.64	86.93	86.93	3.63	2.305	0.096
9	5.69	114.16	114.24	5.19	2.453	0.111
10	6.99	138.73	138.81	6.37	2.347	0.107
11	8.24	166.16	166.22	7.92	2.301	0.110
12	10.77	200.82	200.90	10.59	2.379	0.125
13	11.82	230.45	230.40	14.55	2.539	0.160
14	14.24	274.91	274.68	19.70	2.544	0.182

4.5 ผลของกำลังงานที่คำนวณได้จากใบกังหันลมที่วิเคราะห์ด้วย CFD

ผลของกำลังงานจากใบกังหันลม ซึ่งคำนวณจากค่าที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD ที่มีขนาดความยาวใบ 3.5 m, 3.75 m และ 4.0 m เมื่อต้องการหาค่ากำลังงานจากใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ที่มีขนาดความยาวใบ 35 m, 37.5 m และ 40 m ต้องคูณด้วยอัตราส่วนขยายเท่ากับขนาดอัตราส่วนที่ทำการย่อขนาดลงมานั้นคือ นำค่าที่ได้มาคูณด้วยอัตราส่วน 10:1 จะได้ค่ากำลังงานจากขนาดความยาวใบ 35 m, 37.5 m และ 40 m ตามที่แสดงในตารางที่ 4.7

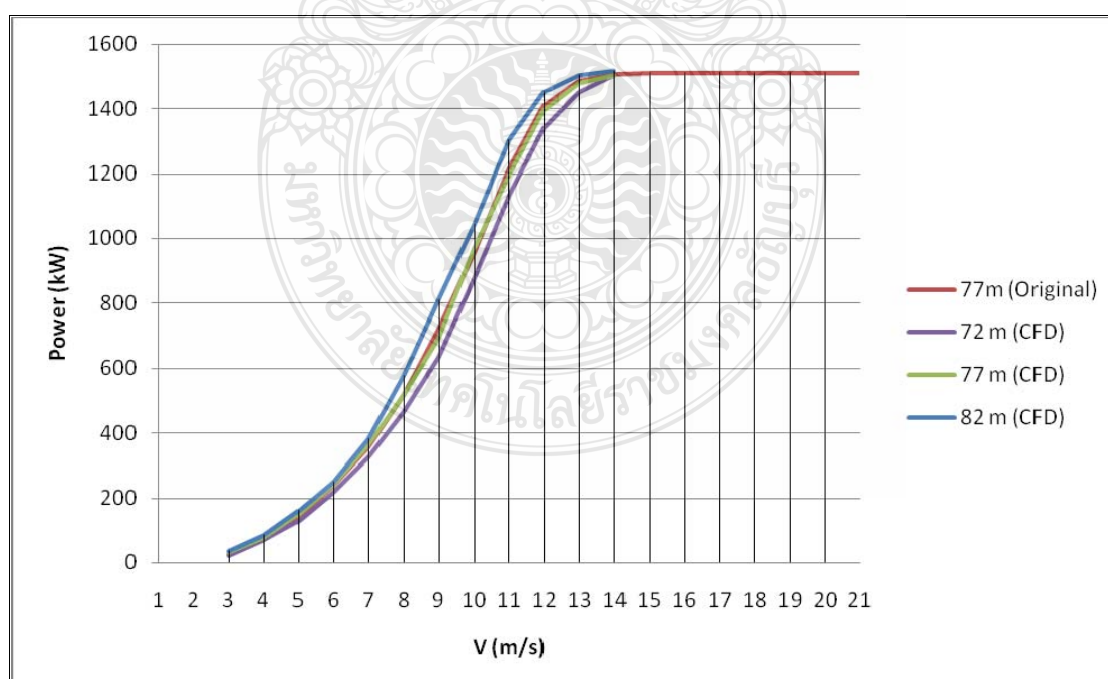
ตารางที่ 4.7 กำลังงานจากใบกังหันลมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD

ความเร็วลม (m/s)	กำลังงานจากใบกังหันลม (kW)					
	3.5 m	3.75 m	4.0 m	35 m	37.5 m	40 m
3	2.538	3.562	4.020	25.38	35.62	40.20
4	7.906	8.491	9.514	79.06	84.91	95.14
5	14.467	16.520	17.913	144.671	165.20	179.13
6	24.073	26.802	27.625	240.73	268.02	276.25
7	36.152	40.208	42.294	361.52	402.08	422.942
8	51.689	57.419	64.028	516.89	574.19	640.28
9	70.339	76.977	90.027	703.39	769.77	900.27
10	97.265	107.499	115.653	972.65	1,074.99	1,156.53
11	125.625	132.694	144.462	1,256.25	1,326.94	1,444.62
12	148.578	154.522	160.854	1,485.78	1,545.22	1,608.54
13	160.754	164.060	166.732	1,607.54	1,640.60	1,667.32
14	166.595	166.578	168.119	1,665.95	1,665.78	1,681.19

และจากตารางที่ 4.7 ที่ขนาดความยาวใบ 35 m, 37.5 m และ 40 m เมื่อนำมาคูณด้วยประสิทธิภาพของชุดเกียร์ ($\eta_m = 0.95$) และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($\eta_e = 0.95$) ตามสมการที่ 3.9 จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิ (P_{net}) ที่ความเร็วลมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าสุทธิจากใบกังหันลม

ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้าสุทธิ (kW)		
	35 m	37.5 m	40 m
3	22.91	32.15	36.29
4	71.35	76.64	85.86
5	130.57	149.09	161.66
6	217.26	241.89	249.32
7	326.27	362.87	381.70
8	466.50	518.21	577.58
9	634.81	694.72	812.49
10	877.81	970.18	1,043.77
11	1,133.76	1,197.56	1,303.77
12	1,340.92	1,394.56	1,451.71
13	1,450.80	1,480.65	1,504.75
14	1,503.52	1,503.37	1,517.28



ภาพที่ 4.5 สมรรถนะกำลังตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบที่วิเคราะห์ด้วย CFD

ค่าที่ได้ตามตารางที่ 4.8 เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิ จากใบกังหันลมแต่ละขนาด เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้เหล่านี้ มาพล็อตกราฟที่ความเร็วลมต่างๆ จะได้กราฟสมรรถนะกำลัง (Power curve) ของใบกังหันลม ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบที่เพิ่มขึ้น เส้นกราฟสมรรถนะกำลังจะยกตัวสูงขึ้น โดยค่าที่ได้เหล่านี้จะนำไปใช้เพื่อคำนวณเปรียบเทียบค่า AEP ต่อไป

4.6 ผลการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานจากใบกังหันลม

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากใบกังหันลมขนาดความยาวใบปกติ ที่มีความยาว 37.5 m (เส้นผ่านศูนย์กลางใบ 77 m) ระหว่างปริมาณพลังงานจากใบจริงที่กังหันลมผลิตได้ กับปริมาณพลังงานจากใบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD เพื่อเปรียบเทียบค่า AEP จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลลมชุดเดียวกันพบว่าค่า AEP ที่ได้จากใบจำลองมีค่ามากกว่าค่า AEP ที่ได้จากใบจริง 1.36% ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ สามารถยอมรับได้ เมื่อนำค่า AEP จากใบจำลองทั้ง 3 ขนาด ที่ทำการเพิ่มและลดขนาดความยาวใบไปเปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากใบกังหันขนาดความยาวปกติ (37.5 m)

เดือน/ปี	ใบจริง (kWh)	ใบจำลอง (kWh)
กรกฎาคม 2552	181,012	182,962
สิงหาคม 2552	203,432	204,586
กันยายน 2552	203,070	203,435
ตุลาคม 2552	146,252	148,859
พฤศจิกายน 2552	105,829	107,336
ธันวาคม 2552	218,182	218,768
มกราคม 2553	199,031	200,891
กุมภาพันธ์ 2553	97,451	100,767
มีนาคม 2553	148,789	150,718
เมษายน 2553	71,820	74,883
พฤษภาคม 2553	74,332	77,596
มิถุนายน 2553	147,918	150,686
AEP	1,797,118	1,821,487
ค่าความแตกต่าง (%)	100 %	101.36 %

ผลการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากใบกังหันลมที่ทำการจำลอง และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 72 m มีค่า AEP เท่ากับ 1,646,813 kWh ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 77 m มีค่า AEP เท่ากับ 1,821,487 kWh และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 82 m มีค่า AEP เท่ากับ 1,974,163 kWh ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า AEP กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบปกติ ที่มีขนาด 77 m พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบเพิ่มขึ้นเป็น 82 m จะได้ค่า AEP เพิ่มขึ้น 152,676 kWh หรือเพิ่มขึ้น 8.38% และเมื่อเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบลดลงเป็น 72 m ได้ค่า AEP ลดลง 174,674 kWh หรือลดลง 9.59% ดังแสดงในตารางที่ 4.10

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพใบกังหันของบริษัทผู้ผลิตใบกังหันลมในต่างประเทศ [20] กังหันลมขนาด 1.5 MW ความยาวใบเพิ่มขึ้น 4.8 m จะมีค่า AEP เพิ่มขึ้นประมาณ 15% เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า AEP จากการจำลองใบกังหันและวิเคราะห์ด้วย CFD จากงานวิจัยนี้ความยาวใบเพิ่มขึ้น 2.5 m ได้ค่า AEP เพิ่มขึ้น 8.38% จะเห็นว่ามียอตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยค่า AEP ที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมในพื้นที่ที่ติดตั้ง รูปแบบของใบกังหันรวมถึงเทคโนโลยีของแต่ละบริษัทผู้ผลิตด้วย

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากใบกังหันลมที่วิเคราะห์ด้วย CFD

เดือน/ปี	72m (kWh)	77m (kWh)	82m (kWh)
กรกฎาคม 2552	165,205	182,962	199,058
สิงหาคม 2552	186,534	204,586	221,665
กันยายน 2552	185,378	203,435	219,504
ตุลาคม 2552	134,381	148,859	160,453
พฤศจิกายน 2552	97,555	107,336	116,818
ธันวาคม 2552	198,418	218,768	237,273
มกราคม 2553	181,093	200,891	219,876
กุมภาพันธ์ 2553	90,009	100,767	108,011
มีนาคม 2553	137,026	150,718	164,115
เมษายน 2553	66,606	74,883	80,710
พฤษภาคม 2553	69,020	77,596	83,321
มิถุนายน 2553	135,588	150,686	163,359
AEP	1,646,813	1,821,487	1,974,163
ค่าความแตกต่าง (%)	-9.59%	0%	+8.38%

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดใหญ่ และศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม จากผลของการเพิ่มและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกังหันลม โดยกังหันลมที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ที่ติดตั้งอยู่ที่อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยได้ ดังนี้

5.1 ผลการวิจัย

5.1.1 จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของกังหันลมขนาด 1.5 MW พบว่า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จริงในรอบ 1 ปี หรือ ค่า AEP ที่ได้จากการเก็บบันทึกข้อมูล ด้วยระบบ SCADA ในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึงเดือนมิถุนายน 2553 นั้น มีค่า AEP 1,505,502 kWh คิดเป็นค่าตัวประกอบกำลังผลิต หรือค่า CF 11.46% เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูล ความเร็วลม พบว่าปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมมีความสอดคล้องกับความเร็วลมเฉลี่ย ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละเดือนอยู่ในช่วงระหว่าง 4-6 m/s และเมื่อพิจารณาเดือนที่มีความเร็วลม เฉลี่ยต่ำกว่า 5 m/s ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จะไม่ดีเท่าที่ควร จากข้อมูลที่ทำกรเก็บ บันทึก บางช่วงมีการหยุดเดินเครื่อง เนื่องจากมีการปรับปรุงระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และระบบกังหันลมเกิดความขัดข้อง ทำให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ด้วย ปัจจัยและสาเหตุเหล่านี้ที่ทำให้มีการหยุดเดินเครื่องบ่อยครั้ง จึงส่งผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าและค่า CF ซึ่งหากเดินเครื่องได้อย่างเต็มที่และต่อเนื่องค่า CF ที่ได้จะเพิ่มขึ้น จากพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลม ผลิตได้ 1,505,502 kWh สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ 884.5 ตัน และลด การนำเข้าน้ำมันดิบได้ถึง 0.12 ktoe ต่อปี หรือประมาณ 120 ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ ความสามารถของกังหันลมในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลความเร็วลมชุดเดียวกัน หากกังหันลม สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่หยุดเดินเครื่อง ปริมาณพลังงานที่คาดว่ากังหันลมจะสามารถ ผลิตได้ในรอบ 1 ปี จะมีค่า AEP เท่ากับ 1,797,118 kWh หรือคิดเป็นค่า CF เท่ากับ 13.68%

5.1.2 จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมต่อผลของการเพิ่มและลดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางใบกังหันลม ด้วยการจำลองขนาดความยาวใบกังหันลม ให้มีขนาดที่แตกต่างกัน 3 ขนาด โดยการเพิ่มและลดขนาดความยาวใบ เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดความยาวใบปกติ โดยใช้ โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาช่วยในการวิเคราะห์หาค่าแรงที่กระทำกับใบ

กังหันลม และทำการคำนวณเปรียบเทียบค่า AEP พบว่าเมื่อทำการจำลองความยาวใบและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD ที่ขนาดความยาวใบปกติ 37.5 m (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 77 m) ได้ค่า AEP 1,821,487 kWh คิดเป็นค่า CF 13.86% เมื่อพิจารณาจากขนาดความยาวใบที่เพิ่มขึ้น ที่ขนาดความยาวใบ 40 m (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 82 m) ได้ค่า AEP 1,974,163 kWh เพิ่มขึ้น 152,676 kWh หรือเพิ่มขึ้น 8.38% คิดเป็นค่า CF 15.02% และเมื่อพิจารณาจากขนาดความยาวใบที่ลดลง ที่ขนาดความยาวใบ 35 m (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 72 m) ได้ค่า AEP 1,646,813 kWh ลดลง 174,674 kWh หรือลดลง 9.59% คิดเป็นค่า CF 12.53% แสดงให้เห็นว่าจากการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล การเพิ่มหรือลดขนาดความยาวใบ มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม

การศึกษาผลของการเพิ่มและลดขนาดความยาวใบกังหัน ด้วยการจำลองใบกังหันลมในงานวิจัยนี้ เพื่อต้องการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม โดยการเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบมาตรฐาน โดยทั่วไป ของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ของบริษัทผู้ผลิตกังหันลมส่วนใหญ่ที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 77 m ซึ่งเป็นกังหันลมที่อยู่ในคลาส II และ III ที่ใช้สำหรับความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงระหว่าง 6-8.5 m/s ประเทศไทยมีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ โดยในพื้นที่ที่มีศักยภาพจะมีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 4-5 m/s ซึ่งเหมาะสมสำหรับกังหันลมที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในคลาส IV ที่ใช้สำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ย 6 m/s หรือต่ำกว่า จึงควรพิจารณาขนาดความยาวใบให้เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม สำหรับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ในประเทศไทย นอกจากการพิจารณาขนาดความยาวใบของกังหันแล้ว ควรคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย เช่น ความเร็วลมเริ่มต้นในการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม (Cut-in Wind Speed) และความเร็วลมที่กังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ที่พิกัด (Rated Wind Speed) เป็นต้น ซึ่งจะต้องศึกษาศักยภาพความเหมาะสมของพื้นที่ที่จะติดตั้ง และเทคโนโลยีกังหันลมของแต่ละบริษัทผู้ผลิตอย่างละเอียดรอบคอบ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติม เพื่อศึกษาด้านทุนเทคโนโลยีของกังหันลมที่มีขนาดความยาวใบมากขึ้นกับปริมาณพลังงานที่ได้ ว่ามีความเหมาะสมคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์หรือไม่

5.2.2 ควรทำการวิเคราะห์ข้อมูลช่วงรอบปีถัดมาเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบข้อมูล

รายการอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **โครงการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง**. กรุงเทพมหานคร, 2551.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **โครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทย**. กรุงเทพมหานคร, 2553.
- [3] Manwell, J.F. and McGowan, J.G. **Wind Energy Explained**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2009.
- [4] FlyingFoam. **TIPS & TRICKS** (Online), Available: <http://www.flyingfoam.com/sites/default/files/symmetricalAirfoils.jpg> (20 October 2012)
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **โครงการศึกษาวิจัย สาขิตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ**. กรุงเทพมหานคร, 2550.
- [6] Bhadra, S.N. and Kastha, D. **Wind Electrical Systems**. New Delhi: Oxford University Press, 2005., pp.1-116.
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **โครงการศึกษาและผลิตต้นแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดไม่น้อยกว่า 250 กิโลวัตต์**. กรุงเทพมหานคร, 2555.
- [8] The Green Initiative Fund (TGIF). **Wind Power** (Online), Available: <http://votetgif.com/wind-power-turbine-energy.html> (20 October 2012)
- [9] Alternative-Energy-Action-Now. **Wind Turbine Energy Harvester of The Zephyrs** (Online), Available: <http://www.alternative-energy-action-now.com/wind-turbine.html> (20 October 2012)
- [10] Mechanical Engineering. **Introduction To Wind Turbine** (Online), Available: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/tag/wind-turbines/> (20 October 2012)

- [11] Rautaruukki Corporation. **NEWS AND EVENTS** (Online), Available:
<http://www.ruukki.com/News-and-events/News-archive/2008/New-solutions-for-wind-turbine-towers> (21 October 2012)
- [12] Hebei Zhuoxin Steel Tower. **PRODUCTS** (Online), Available:
<http://www.hebtower.com/Wind-turbine-tower.html> (20 October 2012)
- [13] Moltec Windpower Products. **PRODUCTS** (Online), Available:
<http://www.moltecwind.com/Products/TowerLighting.html> (21 October 2012)
- [14] Mukund, R. **Engineering Alternative Energy-Wind and Solar Power Systems**.
 New York: CRC Press, 1999.
- [15] Joshua, E. and Tore, W. **Wind Power Plants and Project Development**. New Delhi: PHI Learning, 2011.
- [16] energetyka wiatrowa. **SCADA** (Online), 2007. Available:
http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria_srodowiska/c_odnaw_zrodla_en/en_version/files/scada_en.htm (21 October 2012)
- [17] LM Wind Power. **COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS** (Online), Available:
<http://www.lmwindpower.com/Rotor-Blades/Technology/Design/Aerodynamics/CFD>.
 (20 October 2012)
- [18] สว่างชาติทอง. **การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญา
 มหบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
 ราชมนกคชัญบุรี, 2554.
- [19] Martin, O.L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. Second Edition. London: Earthscan, 2008.
- [20] LM Wind Power. **Globlades** (Online), Available:
<http://www.lmwindpower.com/Rotor-Blades/Products/~media/LMWP%20Brochures/LMWP%20GloBlade%20UK%2010042012%20web.ashx> (20 October 2012)

[21] General Electric Company. **articles** (Online), Available:

<http://www.cohoctonfree.com/articles/GE%201.5%20brochure.pdf> (15 October 2012)

[22] aerodyn Energiesysteme GmbH. **aM 1.5/83** (Online), Available:

www.aerodyn.de/assets/Uploads/PDF/aeDatenblattaeroMaster1.5MW8.pdf

(15 October 2012)



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
อุปกรณ์ภายในกังหันลม





ภาพที่ ก.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ ก.2 เกียร์ทดความเร็วรอบ



ภาพที่ ก.3 เพลาลูก



ภาพที่ ก.4 อุปกรณ์ควบคุมด้านล่างภายในเสากังหันลม



ภาพที่ ก.5 หน้าจอแสดงผล

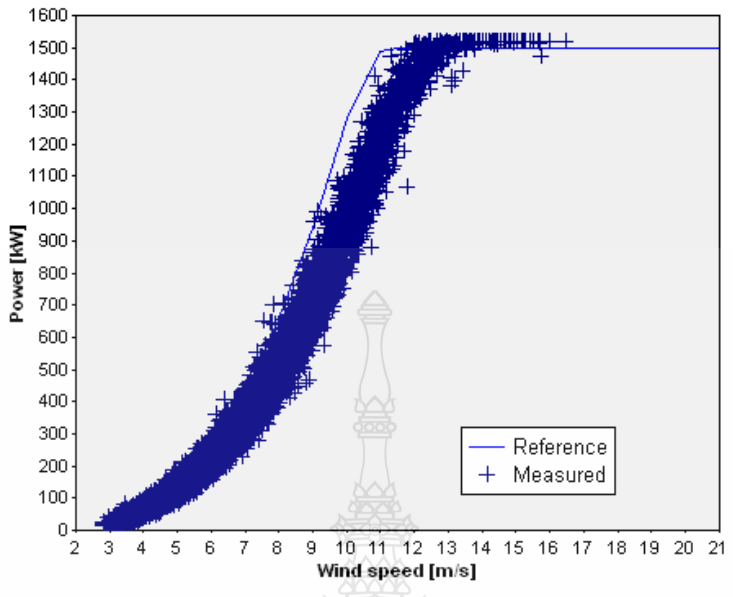


ภาพที่ ก.6 บันไดภายในเสากังหันลมสำหรับตรวจสอบอุปกรณ์บนห้องเครื่อง

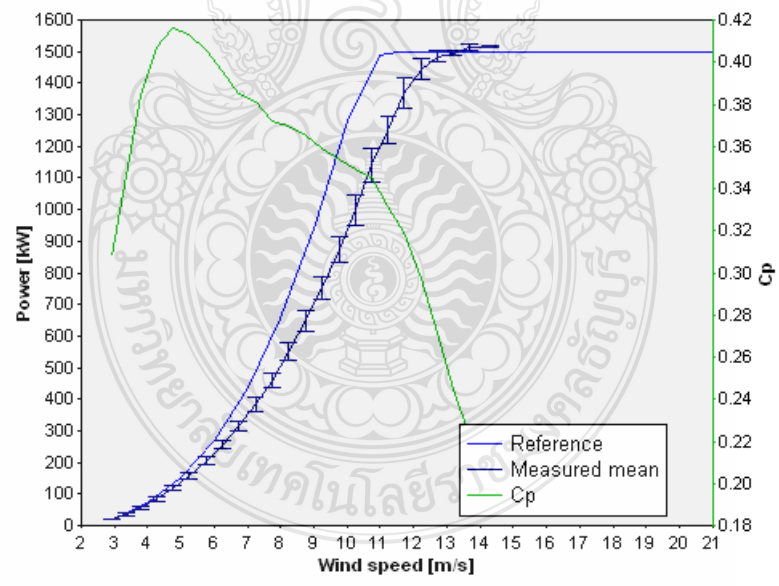


ภาคผนวก ข

ข้อมูลการบันทึกค่าจากระบบ SCADA



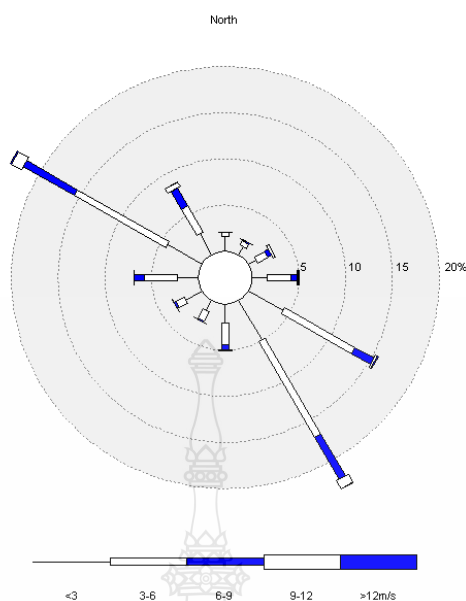
ภาพที่ ข.1 สมรรถนะกำลังการทำงานจริงของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ



ภาพที่ ข.2 สมรรถนะกำลัง(Power curve) และค่า C_p ของกังหันลม

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการบันทึกค่าจากระบบ SCADA

Mean Wind Speed (m/s)	Mean Power Output (kW)	Mean C_p	No. of Values	Min Power Output (kW)	Max Power Output (kW)
2.92	20.45	0.31	14	14.02	39.75
3.35	34.90	0.35	495	10.84	82.29
3.78	55.56	0.38	1,713	19.20	89.47
4.26	83.83	0.41	2,537	38.71	131.64
4.75	118.76	0.42	2,643	58.41	190.48
5.24	158.61	0.41	2,582	80.29	230.26
5.74	204.51	0.41	2,486	118.68	280.81
6.25	256.35	0.40	2,184	157.97	408.69
6.74	313.69	0.38	1,854	201.49	434.48
7.24	384.19	0.38	1,534	255.20	551.56
7.74	458.68	0.37	1,128	311.95	699.75
8.24	550.99	0.37	813	395.61	760.27
8.74	649.35	0.36	575	447.71	861.80
9.24	752.53	0.36	505	560.51	988.82
9.75	871.98	0.35	405	681.85	1,095.79
10.25	999.69	0.35	356	804.60	1,270.78
10.75	1,141.86	0.35	239	879.67	1,412.38
11.24	1,252.00	0.33	164	1,051.41	1,471.74
11.72	1,368.05	0.32	110	1,069.17	1,491.56
12.23	1,445.01	0.30	80	1,336.21	1,516.76
12.72	1,484.36	0.27	43	1,411.48	1,517.77
13.20	1,494.21	0.24	33	1,383.98	1,517.58
13.67	1,512.89	0.22	26	1,493.82	1,518.47
14.31	1,515.86	0.19	17	1,507.80	1,517.83



ภาพที่ ข.3 ทิศทางการกระจายตัวของความเร็วลม

ตารางที่ ข.2 เปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของความเร็วลมช่วงระหว่างเดือน ก.ค. 2552- มิ.ย. 2553

v (m/s)	Wind direction [Degree N]												All Dirs.
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
<0.5	0.08	0.08	0.03	0.08	0.40	0.31	0.14	0.06	0.07	0.06	0.14	0.19	1.64
1	0.44	0.26	0.24	0.28	0.87	0.78	0.49	0.28	0.42	0.26	0.62	0.60	5.54
2	0.73	0.37	0.36	0.51	1.19	1.38	0.73	0.44	0.86	0.90	1.55	1.07	10.08
3	0.31	0.25	0.27	0.61	1.64	2.24	0.58	0.35	0.54	0.88	1.74	0.64	10.05
4	0.21	0.21	0.43	1.03	2.92	3.87	0.85	0.41	0.47	1.00	2.88	0.89	15.17
5	0.09	0.14	0.43	0.93	2.94	4.48	0.89	0.40	0.29	1.35	3.81	1.09	16.84
6	0.06	0.14	0.30	0.54	2.45	3.18	0.52	0.31	0.20	1.07	4.15	1.15	14.06
7	0.04	0.05	0.18	0.33	1.31	2.32	0.39	0.13	0.11	0.64	3.38	1.03	9.89
8	0.00	0.03	0.19	0.17	0.61	1.58	0.14	0.02	0.07	0.29	1.77	0.67	5.54
9	0.01	0.03	0.13	0.11	0.33	1.10	0.06	0.00	0.03	0.08	0.89	0.43	3.21
10	0.01	0.01	0.12	0.09	0.15	0.52	0.04	0.00	0.03	0.03	0.58	0.24	1.82
11			0.10	0.07	0.05	0.29	0.01		0.02	0.02	0.38	0.15	1.10
12	0.00		0.03	0.01	0.02	0.13	0.00		0.00	0.02	0.21	0.10	0.52
13			0.00	0.00	0.02	0.01			0.00		0.08	0.06	0.19
14				0.00	0.00	0.01			0.00		0.04	0.01	0.07
15						0.00					0.01	0.01	0.02
Total	1.98	1.57	2.80	4.75	14.9	22.2	4.84	2.40	3.13	6.61	22.3	8.32	95.74
Mean	2.52	3.25	5.00	4.54	4.63	5.24	4.05	3.67	3.36	4.57	5.61	5.20	4.89

ภาคผนวก ค

การเดินเครื่องและผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม





กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลโป่ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน กรกฎาคม 2552

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					66,775		
01-ก.ค.-52	9.44	640	3.49	90	1,970	5.47	
02-ก.ค.-52	16.53	1,540	3.50	80	1,795	4.99	
03-ก.ค.-52	9.41	720	3.67	70	1,669	4.64	
04-ก.ค.-52	21.06	1,550	3.21	80	1,892	5.26	
05-ก.ค.-52	9.68	590	3.63	80	1,740	4.83	
06-ก.ค.-52	17.14	1,550	2.40	60	1,453	4.04	
07-ก.ค.-52	14.76	1,550	3.57	100	2,290	6.36	
08-ก.ค.-52	10.74	840	3.38	60	1,424	3.96	
09-ก.ค.-52	11.18	1,090	3.92	100	2,415	6.71	
10-ก.ค.-52	14.30	1,540	4.26	150	3,520	9.78	
11-ก.ค.-52	15.92	1,550	8.46	670	15,409	42.80	
12-ก.ค.-52	16.01	1,550	8.06	610	14,092	39.14	
13-ก.ค.-52	14.59	1,540	6.03	300	6,980	19.39	
14-ก.ค.-52	14.88	1,530	4.83	200	4,536	12.60	
15-ก.ค.-52	16.42	1,550	6.88	400	9,246	25.68	
16-ก.ค.-52	14.91	1,550	7.46	490	11,433	31.76	
17-ก.ค.-52	16.00	1,610	6.73	370	8,602	23.89	
18-ก.ค.-52	13.13	1,520	5.44	230	5,362	14.89	
19-ก.ค.-52	13.82	1,530	7.35	440	10,213	28.37	
20-ก.ค.-52	14.78	1,560	7.08	430	9,935	27.60	
21-ก.ค.-52	12.80	1,530	4.96	160	3,776	10.49	
22-ก.ค.-52	13.79	1,530	4.75	190	4,433	12.31	
23-ก.ค.-52	15.58	1,550	7.04	440	10,098	28.05	
24-ก.ค.-52	14.07	1,530	6.90	290	6,758	18.77	
25-ก.ค.-52	15.84	1,550	4.75	130	2,976	8.27	
26-ก.ค.-52	11.42	240	4.51	-	12	0.03	
27-ก.ค.-52	21.36	-	5.08	-	-	-	หยุดเดินเครื่อง
28-ก.ค.-52	11.60	-	5.35	-	-	-	เพื่อขึ้นกวัดน้ำ
29-ก.ค.-52	11.43	-	5.82	-	-	-	Tower ทั้งหมด
30-ก.ค.-52	12.56	-	6.22	-	-	-	
31-ก.ค.-52	17.53	-	7.00	-	-	-	
สรุป	21.36	1,610	5.35	249	144,029	16.00	
				รวมสะสม	210,804		



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลโป่ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน สิงหาคม 2552

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					210,804		
01-ส.ค.-52	15.69	1,540	7.19	150	3,558	9.88	
02-ส.ค.-52	20.97	1,550	6.59	370	8,641	24.00	
03-ส.ค.-52	15.45	1,550	8.05	600	13,929	38.69	
04-ส.ค.-52	17.05	1,560	8.00	610	14,092	39.14	
05-ส.ค.-52	19.47	1,550	8.62	690	15,882	44.12	
06-ส.ค.-52	18.31	1,550	7.89	460	10,773	29.93	
07-ส.ค.-52	17.25	1,550	8.22	630	14,647	40.69	
08-ส.ค.-52	22.34	1,560	7.47	540	12,504	34.73	
09-ส.ค.-52	16.52	1,550	7.58	490	11,280	31.33	
10-ส.ค.-52	16.82	1,560	6.39	390	9,127	25.35	
11-ส.ค.-52	14.24	1,540	6.67	360	8,374	23.26	
12-ส.ค.-52	12.60	1,140	5.36	260	5,948	16.52	
13-ส.ค.-52	8.13	390	4.06	90	2,187	6.08	
14-ส.ค.-52	9.46	650	2.73	30	810	2.25	
15-ส.ค.-52	8.19	380	3.07	50	1,240	3.44	
16-ส.ค.-52	6.87	260	2.33	30	654	1.82	
17-ส.ค.-52	7.46	280	3.43	60	1,450	4.03	
18-ส.ค.-52	8.38	440	2.05	10	137	0.38	
19-ส.ค.-52	10.19	750	2.78	40	816	2.27	
20-ส.ค.-52	10.86	1,220	2.56	30	607	1.69	
21-ส.ค.-52	10.53	710	4.40	130	2,968	8.24	
22-ส.ค.-52	12.61	1,520	5.90	250	6,198	17.22	
23-ส.ค.-52	12.58	1,210	5.64	270	6,157	17.10	
24-ส.ค.-52	10.88	920	5.45	240	5,476	15.21	
25-ส.ค.-52	9.53	690	3.74	110	2,531	7.03	
26-ส.ค.-52	10.17	570	4.21	140	3,289	9.14	
27-ส.ค.-52	8.16	360	3.83	80	1,791	4.98	
28-ส.ค.-52	15.23	1,540	4.84	140	2,459	6.83	
29-ส.ค.-52	15.93	1,550	6.03	290	6,782	18.84	
30-ส.ค.-52	15.36	1,550	5.78	260	6,066	16.85	
31-ส.ค.-52	16.77	1,540	4.68	190	4,347	12.08	
สรุป	22.34	1,560	5.34	258	184,720	16.55	
				รวมสะสม	395,524		



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลโป่ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน กันยายน 2552

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					395,524		
01-ก.ย.-52	19.04	1,550	5.33	220	5,038	13.99	
02-ก.ย.-52	7.70	350	3.37	60	1,450	4.03	
03-ก.ย.-52	11.93	1,110	6.23	280	6,441	17.89	
04-ก.ย.-52	20.31	1,550	7.14	400	9,372	26.03	
05-ก.ย.-52	23.65	1,580	8.71	700	16,272	45.20	
06-ก.ย.-52	19.65	1,560	7.54	540	12,558	34.88	
07-ก.ย.-52	14.58	1,540	5.79	240	6,215	17.26	
08-ก.ย.-52	13.97	1,410	5.63	250	5,743	15.95	
09-ก.ย.-52	15.59	1,110	5.36	70	1,645	4.57	
10-ก.ย.-52	19.80	1,560	7.57	510	11,846	32.91	
11-ก.ย.-52	14.94	1,540	7.53	470	10,963	30.45	
12-ก.ย.-52	18.21	1,540	5.81	250	5,805	16.13	
13-ก.ย.-52	13.79	1,530	5.66	230	5,388	14.97	
14-ก.ย.-52	14.95	1,540	6.30	320	7,401	20.56	
15-ก.ย.-52	15.28	1,550	6.27	290	6,727	18.69	
16-ก.ย.-52	12.98	1,520	6.83	370	8,467	23.52	
17-ก.ย.-52	10.28	760	4.03	110	2,504	6.96	
18-ก.ย.-52	10.04	580	4.41	130	2,902	8.06	
19-ก.ย.-52	15.10	1,540	4.48	160	3,820	10.61	
20-ก.ย.-52	8.42	490	3.39	50	1,225	3.40	
21-ก.ย.-52	9.62	550	5.06	120	2,713	7.54	
22-ก.ย.-52	-	-	-	-	-	-	กฟผ.ปรับปรุงสายส่ง
23-ก.ย.-52	-	-	-	-	-	-	กฟผ.ปรับปรุงสายส่ง
24-ก.ย.-52	-	-	-	-	-	-	กฟผ.ปรับปรุงสายส่ง
25-ก.ย.-52	10.78	850	5.45	70	1,585	4.40	
26-ก.ย.-52	16.84	1,550	6.62	400	9,270	25.75	
27-ก.ย.-52	17.71	1,550	6.18	380	8,751	24.31	
28-ก.ย.-52	15.94	1,550	7.82	560	12,997	36.10	
29-ก.ย.-52	16.83	1,560	9.07	780	18,040	50.11	
30-ก.ย.-52	19.46	1,560	9.37	820	18,990	52.75	
สรุป	23.65	1,580	5.57	293	204,128	18.90	
				รวมสะสม	599,652		



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลโป่ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน ตุลาคม 2552

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					599,652		
01-ต.ค.-52	17.79	1,560	8.09	640	14,780	41.06	
02-ต.ค.-52	19.08	1,560	6.25	310	7,180	19.94	
03-ต.ค.-52	21.19	1,550	7.12	440	10,050	27.92	
04-ต.ค.-52	14.74	1,540	7.59	480	6,914	19.21	
05-ต.ค.-52	13.42	1,010	5.62	150	3,550	9.86	
06-ต.ค.-52	17.53	1,550	7.26	390	8,970	24.92	
07-ต.ค.-52	18.41	1,550	5.80	250	5,690	15.81	
08-ต.ค.-52	18.25	-	5.89	-	-	-	กฟภ.ปรับปรุงสายส่ง
09-ต.ค.-52	11.58	-	4.87	-	-	-	กฟภ.ปรับปรุงสายส่ง
10-ต.ค.-52	14.10	-	5.29	-	-	-	กฟภ.ปรับปรุงสายส่ง
11-ต.ค.-52	16.60	1,540	4.93	100	2,290	6.36	
12-ต.ค.-52	11.13	770	4.86	150	3,480	9.67	
13-ต.ค.-52	9.55	730	3.32	70	1,520	4.22	
14-ต.ค.-52	11.40	850	2.27	30	590	1.64	
15-ต.ค.-52	7.31	270	2.72	40	850	2.36	
16-ต.ค.-52	14.09	1,540	3.19	60	1,360	3.78	
17-ต.ค.-52	8.97	500	4.43	120	2,670	7.42	
18-ต.ค.-52	13.22	1,530	6.30	290	6,560	18.22	
19-ต.ค.-52	13.40	1,040	5.38	220	5,170	14.36	
20-ต.ค.-52	10.34	940	4.54	140	3,250	9.03	
21-ต.ค.-52	15.13	1,270	4.24	110	2,400	6.67	
22-ต.ค.-52	11.79	1,100	3.85	70	1,600	4.44	
23-ต.ค.-52	8.67	420	4.01	100	2,190	6.08	
24-ต.ค.-52	8.80	510	3.91	100	2,330	6.47	
25-ต.ค.-52	8.33	370	4.03	70	1,670	4.64	
26-ต.ค.-52	10.08	830	4.43	120	2,690	7.47	
27-ต.ค.-52	13.34	1,540	3.10	60	1,280	3.56	
28-ต.ค.-52	13.25	1,540	4.26	200	4,560	12.67	
29-ต.ค.-52	10.25	710	4.45	160	3,650	10.14	
30-ต.ค.-52	10.65	830	4.25	120	2,750	7.64	
31-ต.ค.-52	14.45	1,540	3.36	70	1,700	4.72	
สรุป	21.19	1,560	4.83	163	111,694	10.01	
				รวมสะสม	711,346		



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลบัว ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน พฤศจิกายน 2552

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					711,346		
1-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
2-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
3-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
4-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
5-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
6-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
7-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
8-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
9-พ.ย.-52	-	-	-	-	-	-	ระบบไฮดรอลิคขัดข้อง
10-พ.ย.-52	6.92	190	3.72	20	387	1.08	
11-พ.ย.-52	14.58	1,530	3.36	80	1,848	5.13	
12-พ.ย.-52	9.79	660	4.23	110	2,474	6.87	
13-พ.ย.-52	7.18	290	3.01	30	736	2.04	
14-พ.ย.-52	9.23	540	3.16	50	1,191	3.31	
15-พ.ย.-52	5.52	170	2.01	10	132	0.37	
16-พ.ย.-52	6.77	240	2.84	30	744	2.07	
17-พ.ย.-52	12.85	1,320	4.50	140	3,342	9.28	
18-พ.ย.-52	19.17	1,560	3.21	100	2,273	6.31	
19-พ.ย.-52	18.96	1,530	7.43	420	9,713	26.98	
20-พ.ย.-52	19.13	1,540	8.03	390	9,025	25.07	
21-พ.ย.-52	13.62	1,520	9.42	320	7,510	20.86	
22-พ.ย.-52	15.69	1,550	9.94	980	22,695	63.04	
23-พ.ย.-52	14.17	1,530	7.56	510	11,739	32.61	
24-พ.ย.-52	10.66	800	6.04	260	5,973	16.59	
25-พ.ย.-52	8.31	370	4.39	110	2,537	7.05	
26-พ.ย.-52	7.75	320	3.58	50	1,243	3.45	
27-พ.ย.-52	7.96	340	3.93	70	1,706	4.74	
28-พ.ย.-52	7.84	330	4.45	110	2,485	6.90	
29-พ.ย.-52	11.94	1,250	3.78	90	2,144	5.96	
30-พ.ย.-52	15.88	1,540	4.33	150	3,459	9.61	
สรุป	19.17	1,560	3.43	134	93,356	8.64	
				รวมสะสม	804,702		



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลปั้ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน ธันวาคม 2552

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					804,702		
1-ธ.ค.-52	16.87	1,550	5.96	290	6,762	18.78	
2-ธ.ค.-52	22.53	1,550	6.51	370	8,560	23.78	
3-ธ.ค.-52	19.24	1,550	8.79	720	16,671	46.31	
4-ธ.ค.-52	15.93	1,540	7.94	420	9,721	27.00	
5-ธ.ค.-52	14.66	1,530	6.49	160	3,757	10.44	
6-ธ.ค.-52	16.13	1,540	7.24	420	9,740	27.06	
7-ธ.ค.-52	10.52	830	6.12	260	6,030	16.75	
8-ธ.ค.-52	9.93	680	6.25	280	6,476	17.99	
9-ธ.ค.-52	9.81	760	5.84	230	5,424	15.07	
10-ธ.ค.-52	8.79	470	5.34	180	4,168	11.58	
11-ธ.ค.-52	9.88	660	6.01	250	5,718	15.88	
12-ธ.ค.-52	11.65	920	6.78	350	8,057	22.38	
13-ธ.ค.-52	10.58	800	4.72	160	3,636	10.10	
14-ธ.ค.-52	12.03	1,510	2.55	60	1,426	3.96	
15-ธ.ค.-52	5.69	180	1.77	-	27	0.08	
16-ธ.ค.-52	7.55	320	3.20	60	1,448	4.02	
17-ธ.ค.-52	16.53	1,550	6.44	340	7,936	22.04	
18-ธ.ค.-52	12.35	1,230	7.58	470	10,920	30.33	
19-ธ.ค.-52	15.36	1,540	9.37	810	18,792	52.20	
20-ธ.ค.-52	14.43	1,540	8.48	670	15,531	43.14	
21-ธ.ค.-52	15.54	1,540	8.98	760	17,531	48.70	
22-ธ.ค.-52	12.04	1,050	6.62	250	5,762	16.01	
23-ธ.ค.-52	13.25	1,000	5.88	160	3,737	10.38	
24-ธ.ค.-52	12.39	1,210	4.27	130	2,905	8.07	
25-ธ.ค.-52	8.40	410	3.86	80	1,952	5.42	
26-ธ.ค.-52	8.43	410	3.38	70	1,639	4.55	
27-ธ.ค.-52	9.28	530	4.26	130	3,095	8.60	
28-ธ.ค.-52	7.52	320	3.49	70	1,673	4.65	
29-ธ.ค.-52	9.14	440	5.11	160	3,812	10.59	
30-ธ.ค.-52	8.37	410	4.45	110	2,622	7.28	
31-ธ.ค.-52	6.64	250	2.87	30	615	1.71	
สรุป	22.53	1,550	5.70	273	196,143	17.58	
				รวมสะสม	1,000,845		



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลปั้ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน มกราคม 2553

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					1,000,845		
1-ม.ค.-53	9.71	640	4.38	130	3,006	8.35	
2-ม.ค.-53	13.77	1,530	7.75	500	11,664	32.40	
3-ม.ค.-53	13.91	1,530	8.12	570	13,157	36.55	
4-ม.ค.-53	14.86	1,540	7.13	400	9,352	25.98	
5-ม.ค.-53	12.13	1,170	6.09	370	8,574	23.82	
6-ม.ค.-53	16.25	1,550	7.81	530	12,309	34.19	
7-ม.ค.-53	12.74	1,430	6.06	320	7,518	20.88	
8-ม.ค.-53	13.87	1,540	4.83	190	4,499	12.50	
9-ม.ค.-53	7.33	240	3.53	60	1,443	4.01	
10-ม.ค.-53	12.71	1,520	4.19	120	2,716	7.54	
11-ม.ค.-53	6.43	230	2.19	10	326	0.91	
12-ม.ค.-53	7.70	320	2.98	70	1,531	4.25	
13-ม.ค.-53	13.08	1,520	7.94	540	12,511	34.75	
14-ม.ค.-53	15.44	1,540	8.83	660	15,221	42.28	
15-ม.ค.-53	13.37	1,500	7.82	530	12,277	34.10	
16-ม.ค.-53	13.65	1,540	5.34	210	4,834	13.43	
17-ม.ค.-53	11.31	930	5.07	180	4,098	11.38	
18-ม.ค.-53	10.30	850	3.72	80	1,813	5.04	
19-ม.ค.-53	10.64	770	5.16	200	4,710	13.08	
20-ม.ค.-53	8.83	530	4.41	110	2,511	6.98	
21-ม.ค.-53	7.92	380	3.19	60	1,458	4.05	
22-ม.ค.-53	10.91	810	4.03	100	2,213	6.15	
23-ม.ค.-53	10.43	630	5.55	210	4,858	13.49	
24-ม.ค.-53	10.78	890	6.44	310	7,204	20.01	
25-ม.ค.-53	9.14	530	5.40	190	4,403	12.23	
26-ม.ค.-53	12.25	1,520	6.78	360	8,387	23.30	
27-ม.ค.-53	11.59	1,090	7.66	400	9,368	26.02	
28-ม.ค.-53	11.31	940	5.74	250	5,732	15.92	
29-ม.ค.-53	9.63	620	4.57	120	2,678	7.44	
30-ม.ค.-53	10.41	720	6.38	250	5,744	15.96	
31-ม.ค.-53	8.52	440	5.03	160	3,627	10.08	
สรุป	16.25	1,550	5.62	264	189,742	17.00	
				รวมสะสม	1,190,587		



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลใหญ่ ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน กุมภาพันธ์ 2553

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					1,190,587		
1-ก.พ.-53	8.50	460	4.17	100	2,246	6.24	
2-ก.พ.-53	8.72	440	4.10	90	2,131	5.92	
3-ก.พ.-53	7.60	310	3.26	70	1,673	4.65	
4-ก.พ.-53	9.56	590	4.78	170	3,961	11.00	
5-ก.พ.-53	7.27	310	3.52	60	1,301	3.61	
6-ก.พ.-53	7.99	330	3.33	60	1,441	4.00	
7-ก.พ.-53	9.74	580	5.29	190	4,309	11.97	
8-ก.พ.-53	10.12	520	4.74	140	3,158	8.77	
9-ก.พ.-53	9.75	610	5.50	200	4,681	13.00	
10-ก.พ.-53	10.75	780	6.64	330	7,618	21.16	
11-ก.พ.-53	9.62	550	5.05	160	3,706	10.29	
12-ก.พ.-53	7.32	320	3.46	60	1,307	3.63	
13-ก.พ.-53	9.69	560	5.46	200	4,674	12.98	
14-ก.พ.-53	10.85	770	6.07	260	5,947	16.52	
15-ก.พ.-53	8.17	380	4.13	90	2,097	5.83	
16-ก.พ.-53	10.58	690	5.36	200	4,571	12.70	
17-ก.พ.-53	10.23	750	6.09	260	6,101	16.95	
18-ก.พ.-53	12.80	1,230	7.25	440	10,059	27.94	
19-ก.พ.-53	11.08	880	6.31	290	6,804	18.90	
20-ก.พ.-53	7.96	340	4.10	90	2,083	5.79	
21-ก.พ.-53	9.62	590	3.50	80	1,846	5.13	
22-ก.พ.-53	8.23	370	3.62	70	1,718	4.77	
23-ก.พ.-53	9.09	590	4.87	150	3,361	9.34	
24-ก.พ.-53	8.36	400	3.04	60	1,324	3.68	
25-ก.พ.-53	7.92	330	2.28	30	682	1.89	
26-ก.พ.-53	8.96	550	3.31	70	1,717	4.77	
27-ก.พ.-53	8.57	410	3.07	70	1,569	4.36	
28-ก.พ.-53	9.61	500	3.66	80	1,840	5.11	
สรุป	12.80	1,230	4.50	145	93,925	9.32	
				รวมสะสม	1,284,512		



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน

รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลปิ้ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน มีนาคม 2553

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					1,284,512		
1-มี.ค.-53	7.09	260	2.54	30	618	1.72	
2-มี.ค.-53	6.48	180	1.68	10	232	0.64	
3-มี.ค.-53	8.26	390	3.90	50	1,064	2.96	
4-มี.ค.-53	8.42	410	2.86	60	1,417	3.94	
5-มี.ค.-53	7.56	300	2.87	50	1,124	3.12	
6-มี.ค.-53	8.92	460	3.75	80	1,891	5.25	
7-มี.ค.-53	8.91	330	4.15	100	2,287	6.35	
8-มี.ค.-53	7.69	310	2.71	10	312	0.87	
9-มี.ค.-53	7.46	310	2.86	30	769	2.14	
10-มี.ค.-53	15.47	1,550	8.18	680	15,808	43.91	
11-มี.ค.-53	15.38	1,550	10.80	1,180	27,256	75.71	
12-มี.ค.-53	14.09	1,530	6.91	370	8,671	24.09	
13-มี.ค.-53	7.44	310	3.80	70	1,521	4.23	
14-มี.ค.-53	8.22	380	3.59	70	1,662	4.62	
15-มี.ค.-53	6.17	-	2.47	-	-	-	
16-มี.ค.-53	8.44	-	3.29	-	-	-	
17-มี.ค.-53	13.43	1,530	7.07	310	7,241	20.11	
18-มี.ค.-53	14.33	1,530	9.13	760	17,528	48.69	
19-มี.ค.-53	14.21	1,540	6.83	390	8,982	24.95	
20-มี.ค.-53	8.61	470	4.49	130	2,998	8.33	
21-มี.ค.-53	9.44	480	3.35	90	1,968	5.47	
22-มี.ค.-53	9.28	540	4.93	150	3,385	9.40	
23-มี.ค.-53	9.02	530	4.75	130	3,083	8.56	
24-มี.ค.-53	9.83	540	3.56	110	2,436	6.77	
25-มี.ค.-53	7.49	250	2.62	40	962	2.67	
26-มี.ค.-53	13.44	1,290	5.70	310	7,138	19.83	
27-มี.ค.-53	14.64	1,540	6.78	240	5,623	15.62	
28-มี.ค.-53	12.03	1,080	4.52	50	2,364	6.57	
29-มี.ค.-53	13.74	420	4.30	-	12	0.03	
30-มี.ค.-53	13.79	1,540	3.35	40	1,003	2.79	
31-มี.ค.-53	6.67	290	2.71	20	484	1.34	
สรุป	15.47	1,550	4.53	179	129,839	11.63	
				รวมสะสม	1,414,351		



รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลโป่ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน **เมษายน** 2553

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					1,414,351		
1-เม.ย.-53	7.23	330	3.07	40	895	2.49	
2-เม.ย.-53	8.78	430	3.91	80	1,889	5.25	
3-เม.ย.-53	8.42	400	3.94	100	2,236	6.21	
4-เม.ย.-53	10.04	550	5.74	220	5,023	13.95	
5-เม.ย.-53	10.44	500	3.46	70	1,678	4.66	
6-เม.ย.-53	8.55	420	3.69	90	2,133	5.93	
7-เม.ย.-53	8.06	320	3.74	70	1,545	4.29	
8-เม.ย.-53	8.33	390	3.34	80	1,768	4.91	
9-เม.ย.-53	9.32	560	3.20	70	1,721	4.78	
10-เม.ย.-53	9.68	480	3.52	70	1,725	4.79	
11-เม.ย.-53	9.06	530	3.43	80	1,865	5.18	
12-เม.ย.-53	9.65	540	3.36	80	1,960	5.44	
13-เม.ย.-53	8.73	370	3.40	70	1,551	4.31	
14-เม.ย.-53	10.22	710	4.75	160	3,739	10.39	
15-เม.ย.-53	7.36	320	2.97	-	94	0.26	
16-เม.ย.-53	6.79	-	3.10	-	-	-	WTG ชัดข้อง
17-เม.ย.-53	9.94	-	5.09	-	-	-	WTG ชัดข้อง
18-เม.ย.-53	9.34	-	4.29	-	-	-	WTG ชัดข้อง
19-เม.ย.-53	7.35	-	3.08	-	-	-	WTG ชัดข้อง
20-เม.ย.-53	10.75	-	2.06	-	-	-	WTG ชัดข้อง
21-เม.ย.-53	7.57	-	3.18	-	-	-	WTG ชัดข้อง
22-เม.ย.-53	10.06	-	3.84	-	-	-	WTG ชัดข้อง
23-เม.ย.-53	8.88	-	3.13	-	-	-	WTG ชัดข้อง
24-เม.ย.-53	10.60	820	4.91	120	2,834	7.87	
25-เม.ย.-53	13.05	1,490	7.20	400	9,241	25.67	
26-เม.ย.-53	11.10	1,000	5.46	200	4,722	13.12	
27-เม.ย.-53	7.65	300	2.61	30	595	1.65	
28-เม.ย.-53	7.63	330	2.34	30	621	1.73	
29-เม.ย.-53	14.92	1,540	3.10	100	2,361	6.56	
30-เม.ย.-53	10.76	600	4.24	120	2,819	7.83	
สรุป	14.92	1,540	3.77	76	53,015	4.91	
				รวมสะสม	1,467,366		



รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลปั้ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน พฤษภาคม 2553

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					1,467,366		
1-พ.ค.-53	10.93	1,030	3.54	80	1,866	5.18	
2-พ.ค.-53	8.27	350	3.44	70	1,678	4.66	
3-พ.ค.-53	9.18	50	4.07	100	2,292	6.37	
4-พ.ค.-53	8.55	400	3.03	60	1,407	3.91	
5-พ.ค.-53	8.95	430	3.23	70	1,593	4.43	
6-พ.ค.-53	8.92	490	3.75	90	2,090	5.81	
7-พ.ค.-53	10.03	680	3.83	120	2,686	7.46	
8-พ.ค.-53	7.30	280	2.81	40	887	2.46	
9-พ.ค.-53	8.14	360	3.25	60	1,349	3.75	
10-พ.ค.-53	8.18	330	2.58	50	1,101	3.06	
11-พ.ค.-53	9.08	490	4.31	100	2,417	6.71	
12-พ.ค.-53	10.45	730	3.14	70	1,708	4.74	
13-พ.ค.-53	15.77	1,540	4.21	120	2,816	7.82	
14-พ.ค.-53	8.56	400	2.77	40	1,029	2.86	
15-พ.ค.-53	8.29	370	3.68	70	1,585	4.40	
16-พ.ค.-53	12.99	1,540	3.97	110	2,611	7.25	
17-พ.ค.-53	13.30	1,530	6.27	290	6,791	18.86	
18-พ.ค.-53	7.78	330	2.71	20	551	1.53	
19-พ.ค.-53	9.13	480	2.84	40	1,032	2.87	
20-พ.ค.-53	8.25	330	3.65	70	1,724	4.79	
21-พ.ค.-53	9.08	430	3.66	70	1,699	4.72	
22-พ.ค.-53	13.59	1,520	4.14	120	2,672	7.42	
23-พ.ค.-53	11.54	950	5.08	160	3,720	10.33	
24-พ.ค.-53	8.64	430	4.12	90	2,172	6.03	
25-พ.ค.-53	18.07	-	3.92	-	-	-	WTG ชัดข้อง
26-พ.ค.-53	11.98	240	4.24	20	512	1.42	
27-พ.ค.-53	14.16	1,540	5.24	180	4,247	11.80	
28-พ.ค.-53	9.32	540	4.17	90	2,158	5.99	
29-พ.ค.-53	12.69	1,440	5.02	160	3,813	10.59	
30-พ.ค.-53	8.98	470	3.97	90	2,164	6.01	
31-พ.ค.-53	13.00	1,430	3.48	70	1,585	4.40	
สรุป	18.07	1,540	3.81	88	63,955	5.73	
				รวมสะสม	1,531,321		



รายงานผลการเดินเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้า
โครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1,500 กิโลวัตต์
บ้านทะเลปั้ง ต.หัวไทร อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช
ประจำเดือน มิถุนายน 2553

ว/ด/ป	W-S Max (m/s)	P-Max (kW)	W-S Mean (m/s)	P-Mean (kW)	Energy (kWh)	%CF	REMARK
ยกมา					1,531,321		
1-มิ.ย.-53	12.85	350	3.92	40	1,012	2.81	
2-มิ.ย.-53	11.01	-	5.00	-	-	-	WTG ชัดข้อง
3-มิ.ย.-53	9.90	390	4.35	10	266	0.74	
4-มิ.ย.-53	16.09	1,450	5.25	140	3,294	9.15	
5-มิ.ย.-53	12.61	950	5.93	210	4,944	13.73	
6-มิ.ย.-53	16.49	70	5.81	70	1,606	4.46	
7-มิ.ย.-53	16.45	70	5.60	40	1,033	2.87	
8-มิ.ย.-53	12.45	-	5.32	-	-	-	WTG ชัดข้อง
9-มิ.ย.-53	21.55	-	4.67	-	-	-	WTG ชัดข้อง
10-มิ.ย.-53	11.31	-	3.36	-	-	-	WTG ชัดข้อง
11-มิ.ย.-53	8.80	-	3.08	-	-	-	WTG ชัดข้อง
12-มิ.ย.-53	7.34	-	2.40	-	-	-	WTG ชัดข้อง
13-มิ.ย.-53	6.88	-	2.99	-	-	-	WTG ชัดข้อง
14-มิ.ย.-53	8.79	-	3.41	-	-	-	WTG ชัดข้อง
15-มิ.ย.-53	9.15	-	4.70	-	-	-	WTG ชัดข้อง
16-มิ.ย.-53	11.49	-	5.14	-	-	-	WTG ชัดข้อง
17-มิ.ย.-53	14.46	930	7.32	140	3,127	8.69	WTG ชัดข้อง
18-มิ.ย.-53	9.24	550	4.48	90	2,232	6.20	
19-มิ.ย.-53	10.12	-	4.48	-	64	0.18	
20-มิ.ย.-53	10.63	-	5.46	-	34	0.09	
21-มิ.ย.-53	14.28	-	7.28	-	-	-	WTG ชัดข้อง
22-มิ.ย.-53	14.52	-	7.45	-	-	-	WTG ชัดข้อง
23-มิ.ย.-53	18.87	-	6.93	-	-	-	WTG ชัดข้อง
24-มิ.ย.-53	10.77	-	3.18	-	-	-	WTG ชัดข้อง
25-มิ.ย.-53	12.14	-	6.49	-	-	-	WTG ชัดข้อง
26-มิ.ย.-53	14.45	280	4.55	20	409	1.14	
27-มิ.ย.-53	8.21	360	3.54	60	1,464	4.07	
28-มิ.ย.-53	17.76	1,550	6.67	290	6,813	18.93	
29-มิ.ย.-53	14.11	1,540	7.06	400	9,326	25.91	
30-มิ.ย.-53	15.92	1,540	5.56	240	5,528	15.36	
สรุป	21.55	1,550	5.05	58	40,956	3.79	
				รวมสะสม	1,572,277		

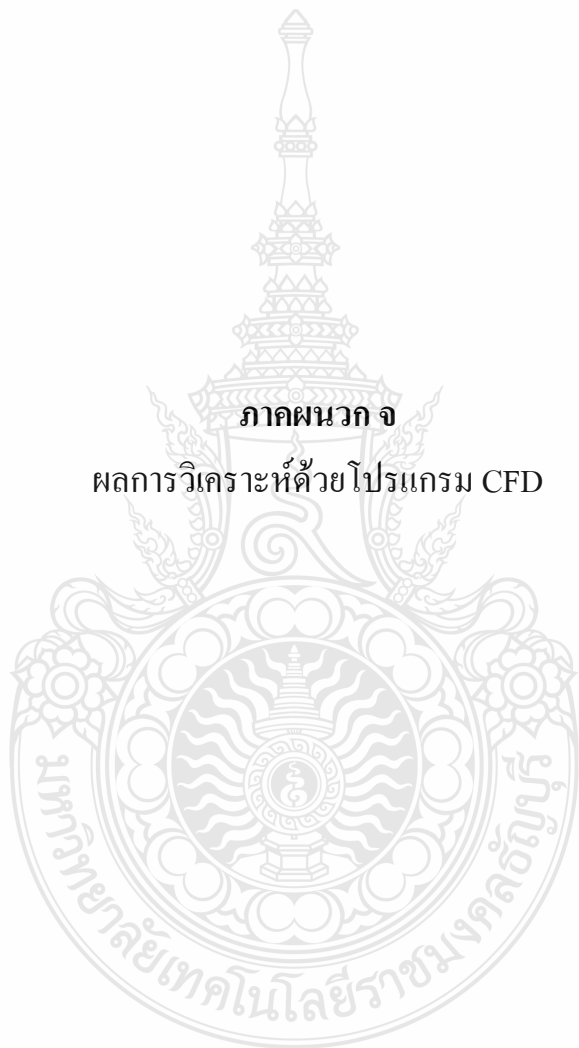
ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กักหั่นลมควรผลิตได้



ตารางที่ ง.1 ปริมาณพลังงานที่กังหันลมควรผลิตได้เดือนกรกฎาคม 2552

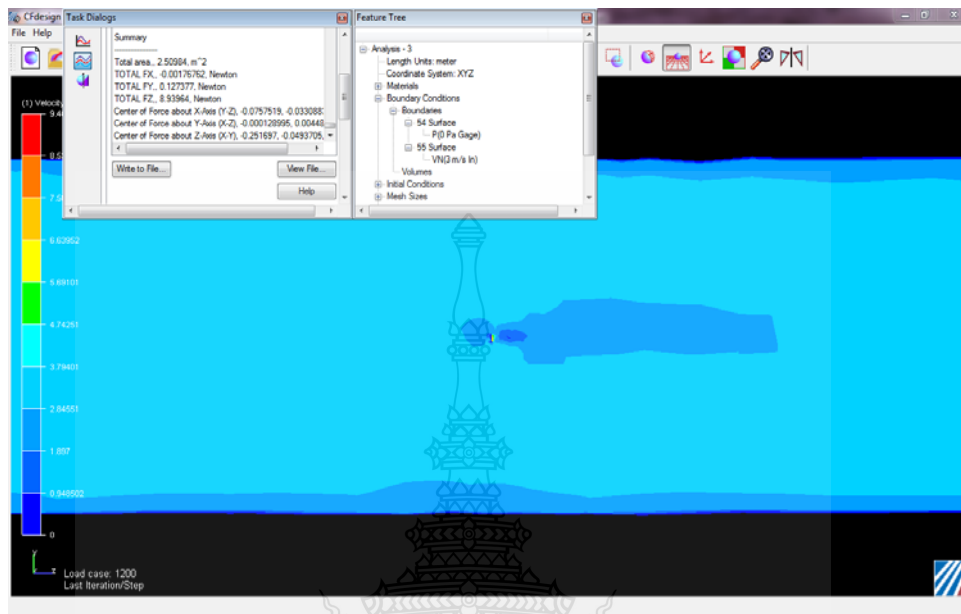
ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า (kW)	ชั่วโมงการเกิดลม (hr)	ปริมาณพลังงาน (kWh)
3	24.75	70.3	1,739.93
4	71.2	92.6	6,593.12
5	142.46	114.3	16,283.18
6	235.8	119.2	28,107.36
7	357.22	92.6	33,078.57
8	517.29	62.9	32,537.54
9	720.87	38.5	27,753.50
10	955.91	20.8	19,882.93
11	1,216.59	8.6	10,462.67
12	1,409.59	2.4	3,383.02
13	1,484.28	0.7	1,039.00
14	1,507.66	0	0
15	1,510.00	0.1	150.00
16	1,510.00	0	0
17	1,510.00	0	0
18	1,510.00	0	0
19	1,510.00	0	0
20	1,510.00	0	0
21	1,510.00	0	0
รวม		623	181,012



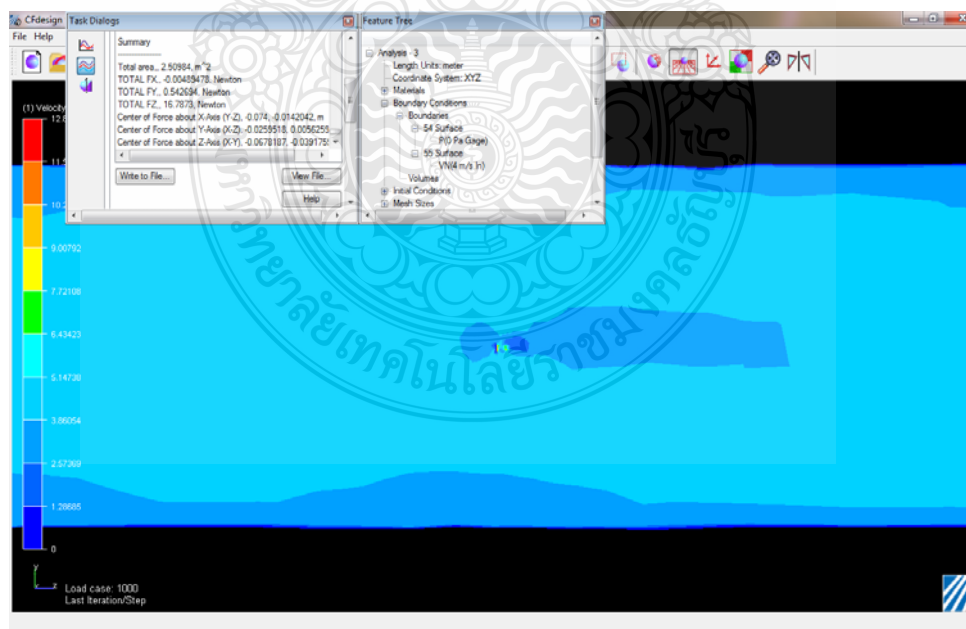
ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD

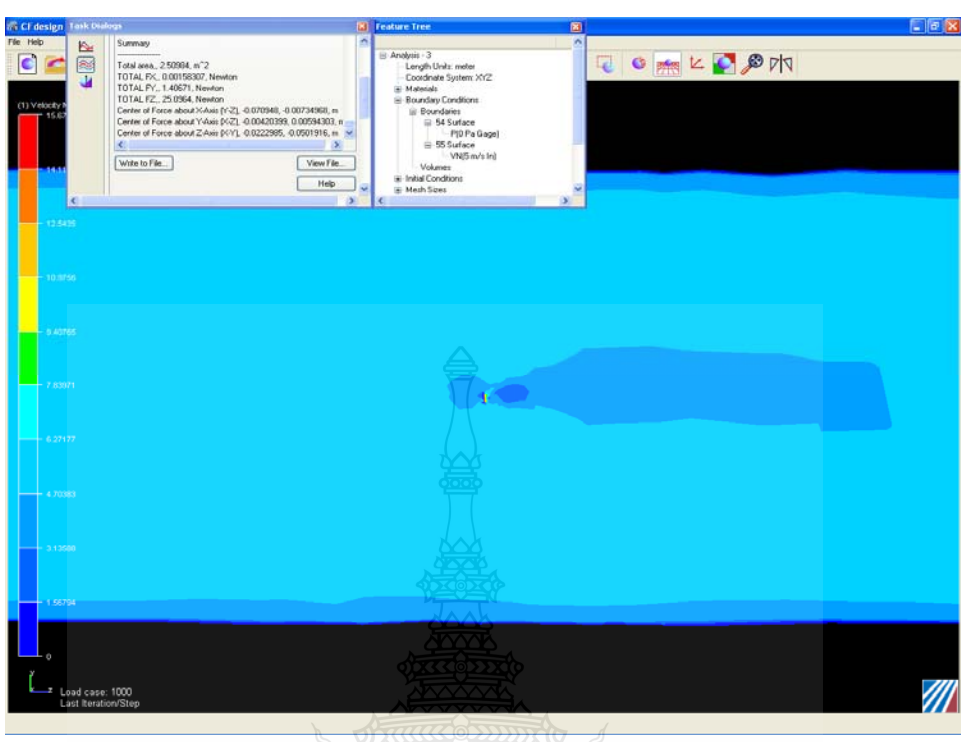
ผลการวิเคราะห์ที่บังคับหนดขนาดความยาว 3.5 เมตร



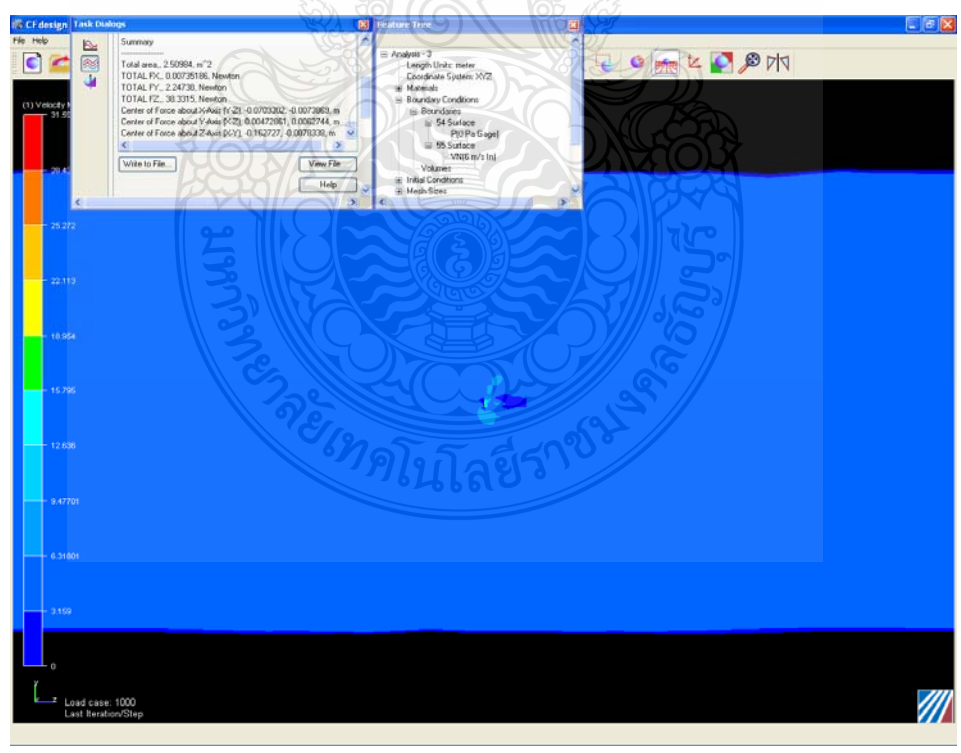
ภาพที่ จ.1 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 3 m/s



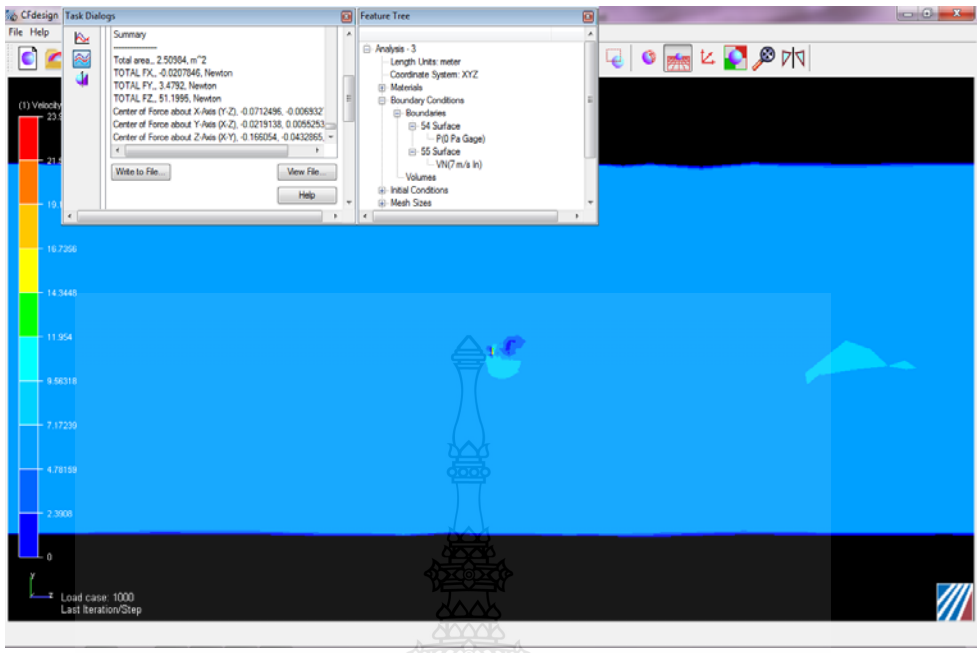
ภาพที่ จ.2 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 4 m/s



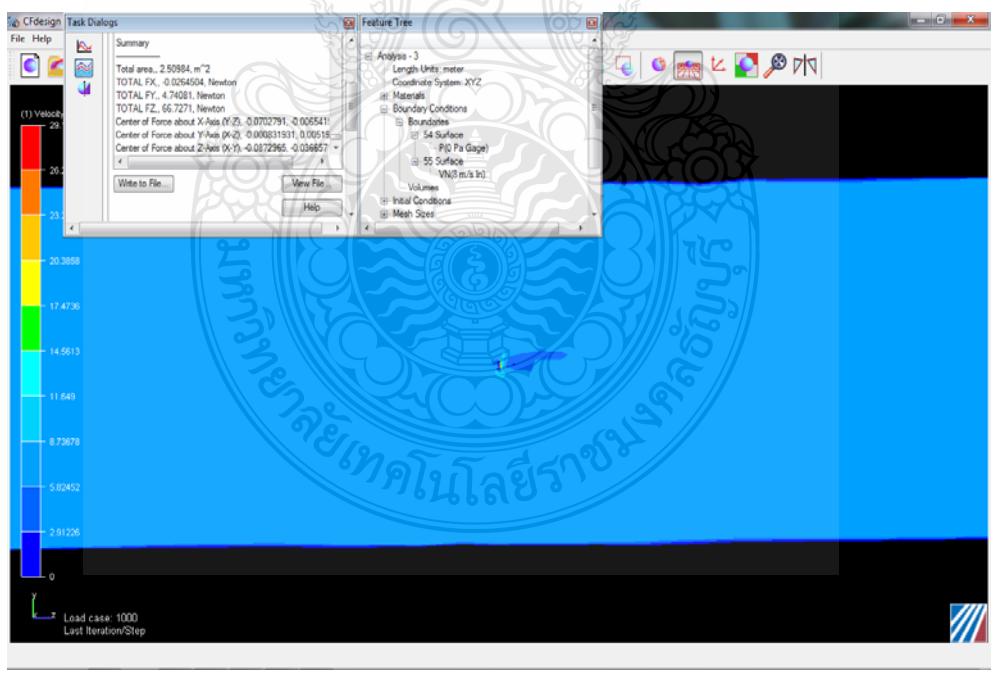
ภาพที่ จ.3 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 5 m/s



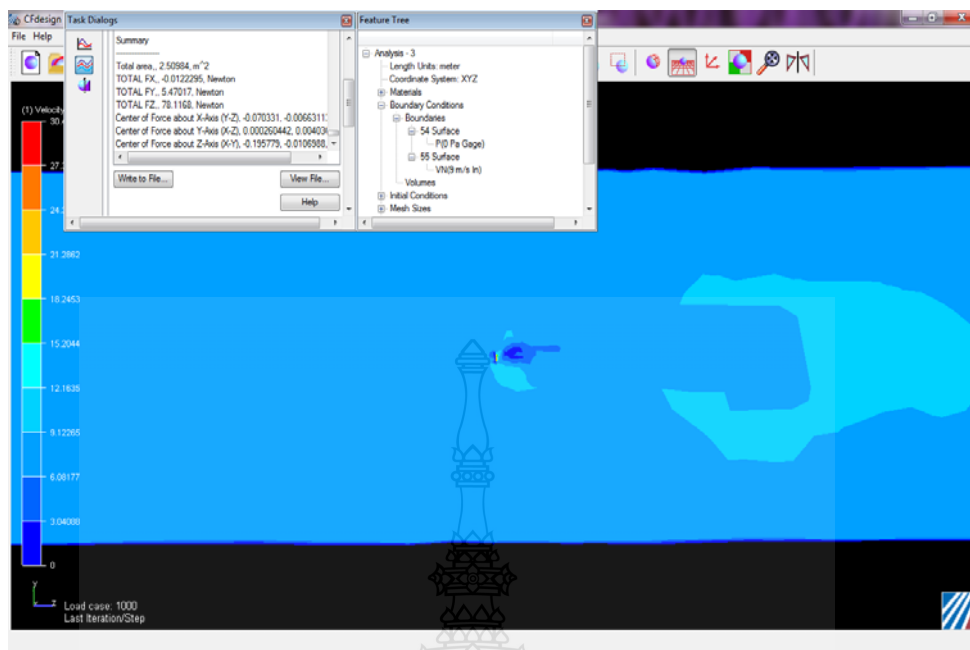
ภาพที่ จ.4 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 6 m/s



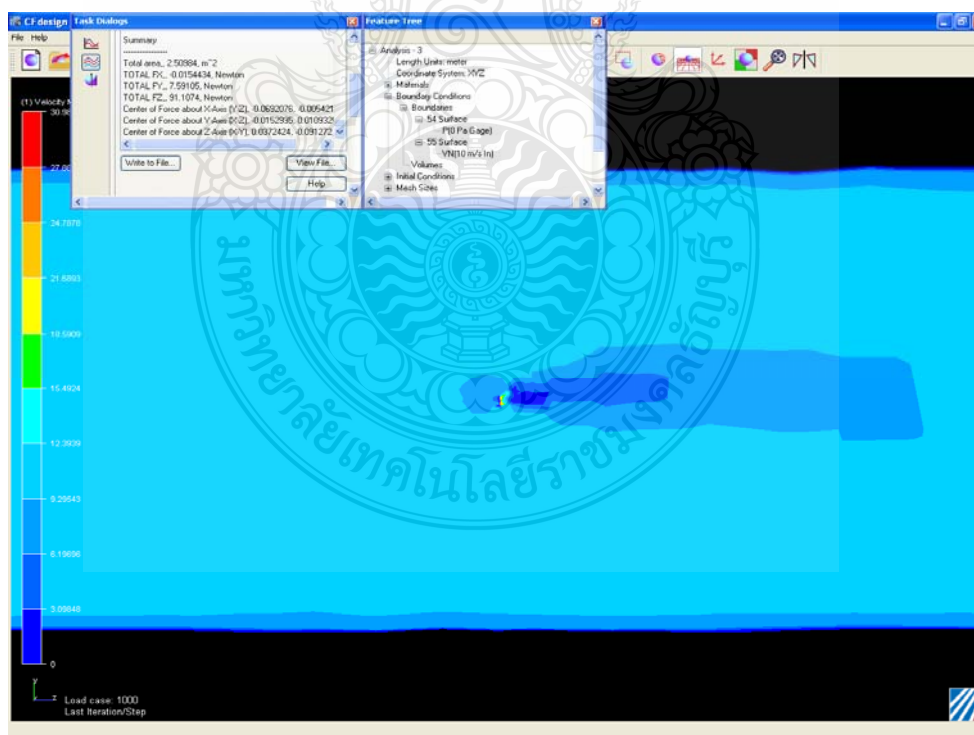
ภาพที่ จ.5 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 7 m/s



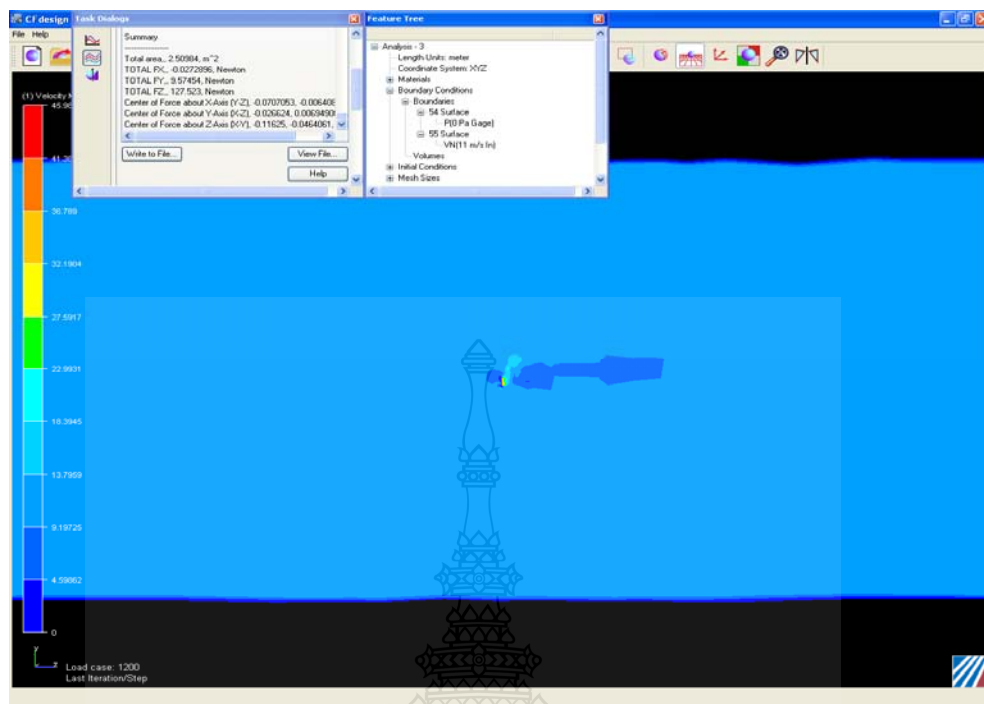
ภาพที่ จ.6 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 8 m/s



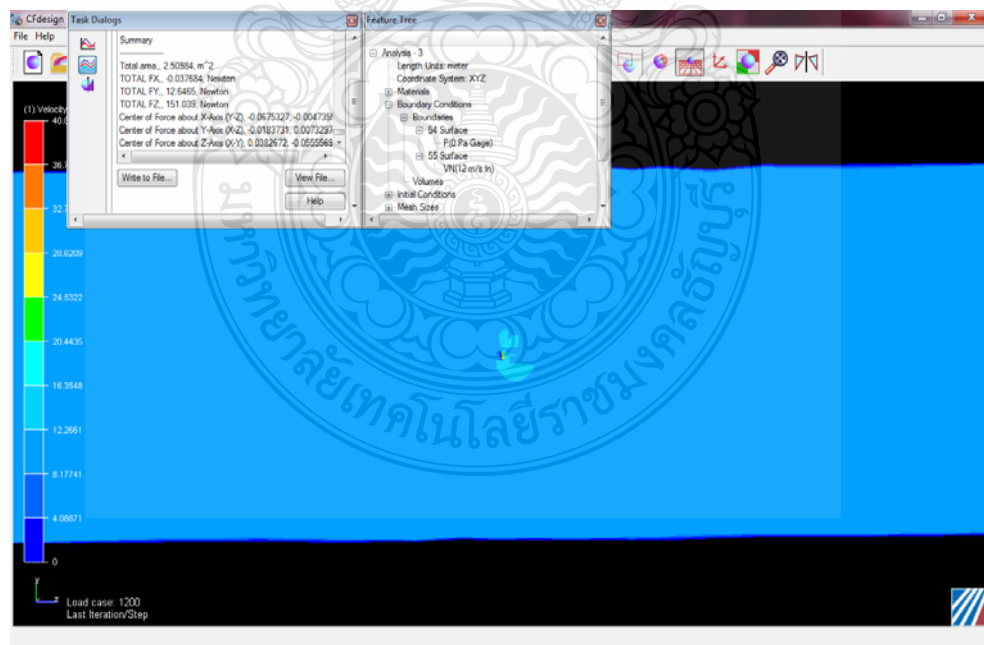
ภาพที่ จ.7 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 9 m/s



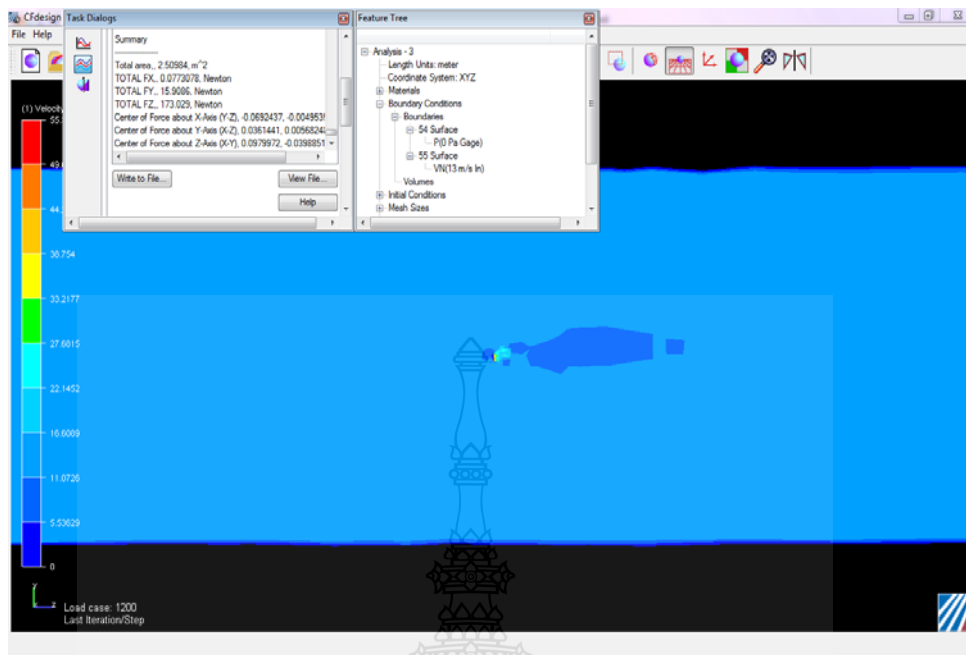
ภาพที่ จ.8 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 10 m/s



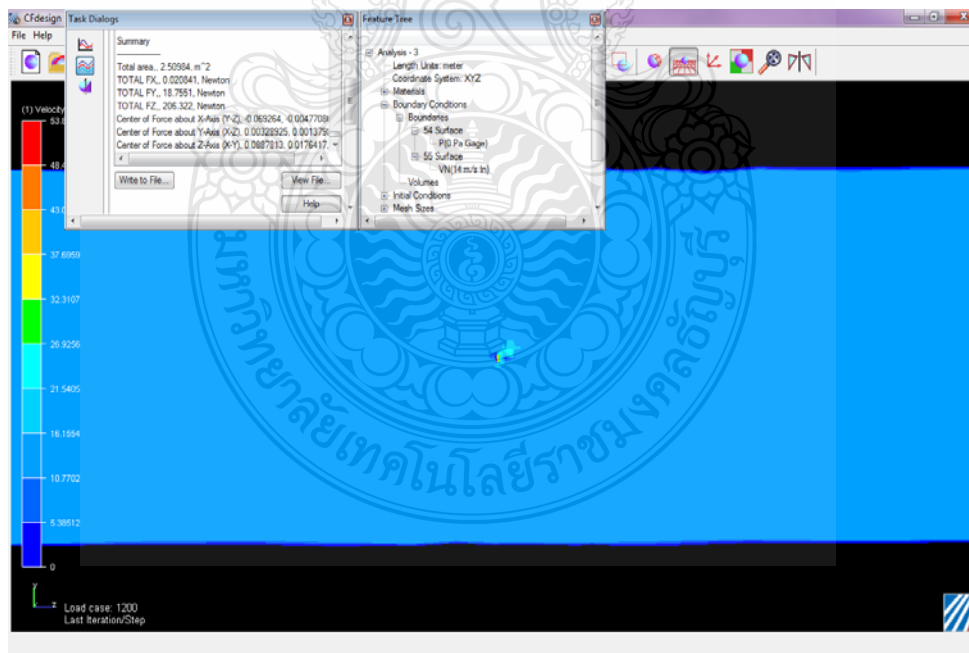
ภาพที่ จ.9 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 11 m/s



ภาพที่ จ.10 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 12 m/s

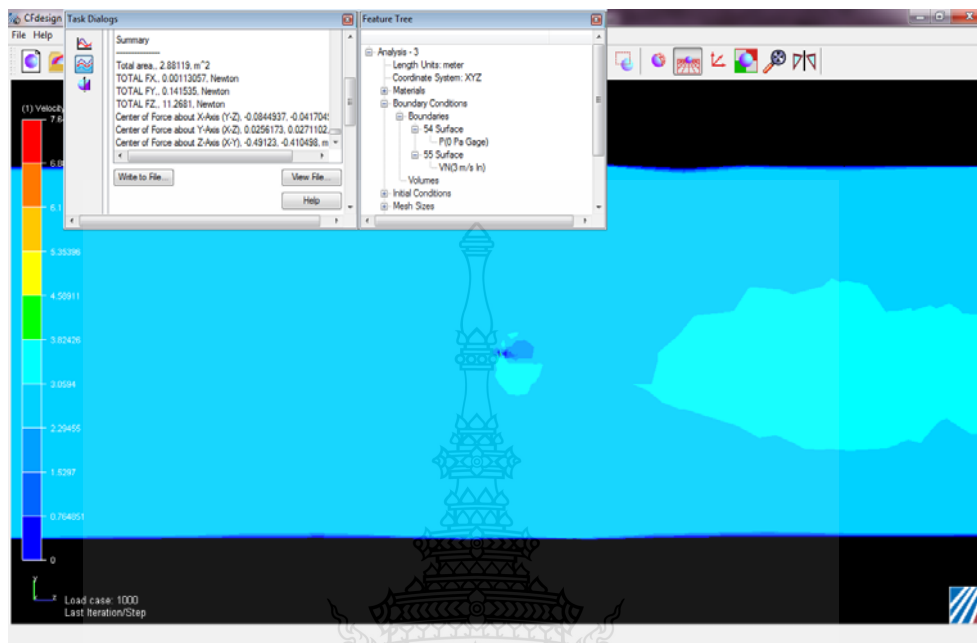


ภาพที่ จ.11 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 13 m/s

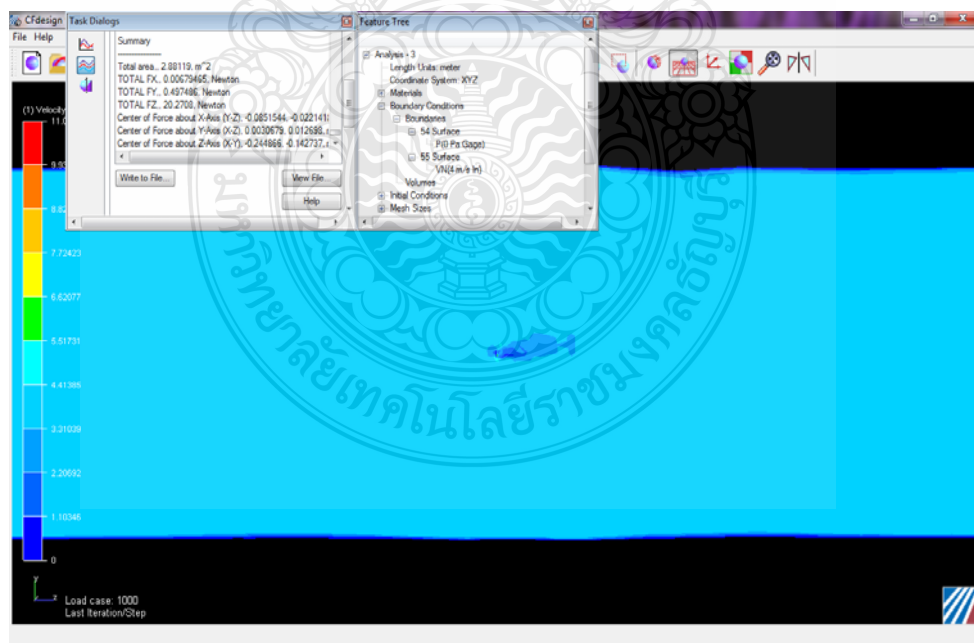


ภาพที่ จ.12 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 14 m/s

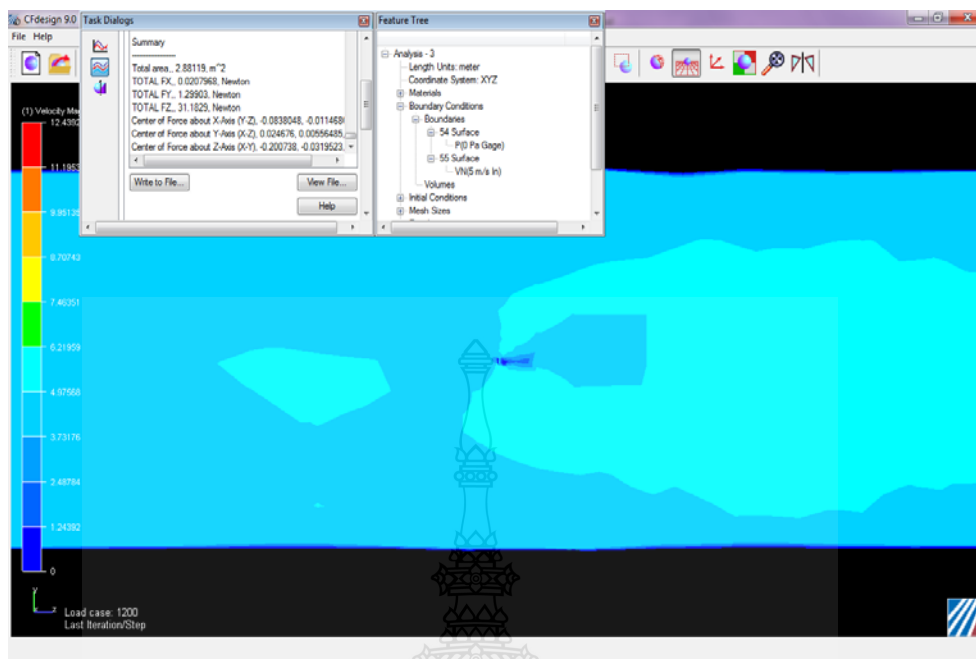
ผลวิเคราะห์ที่ใบกังหันขนาดความยาว 3.75 เมตร



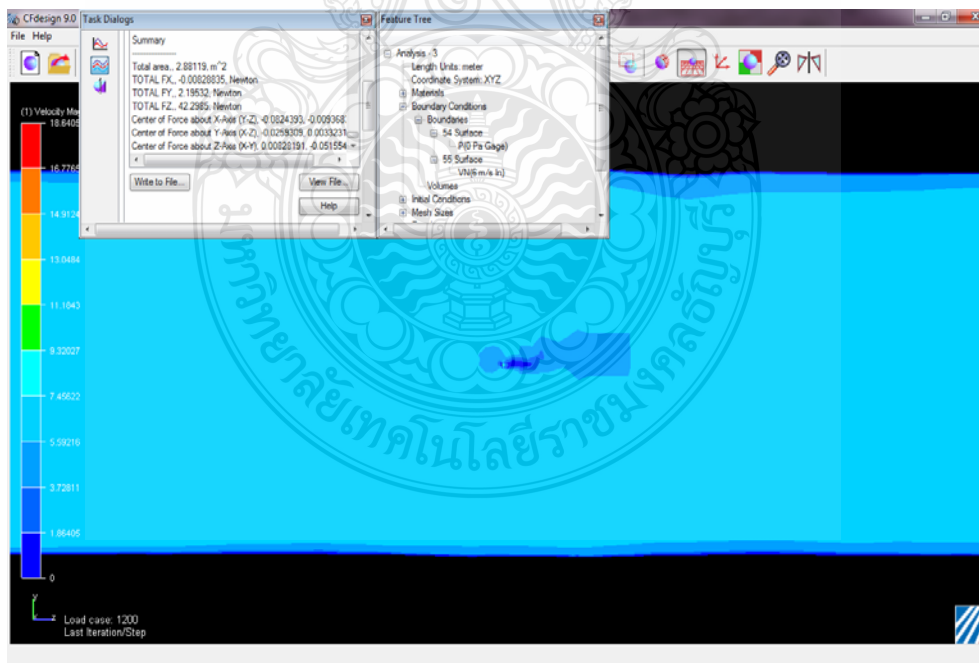
ภาพที่ จ.13 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 3 m/s



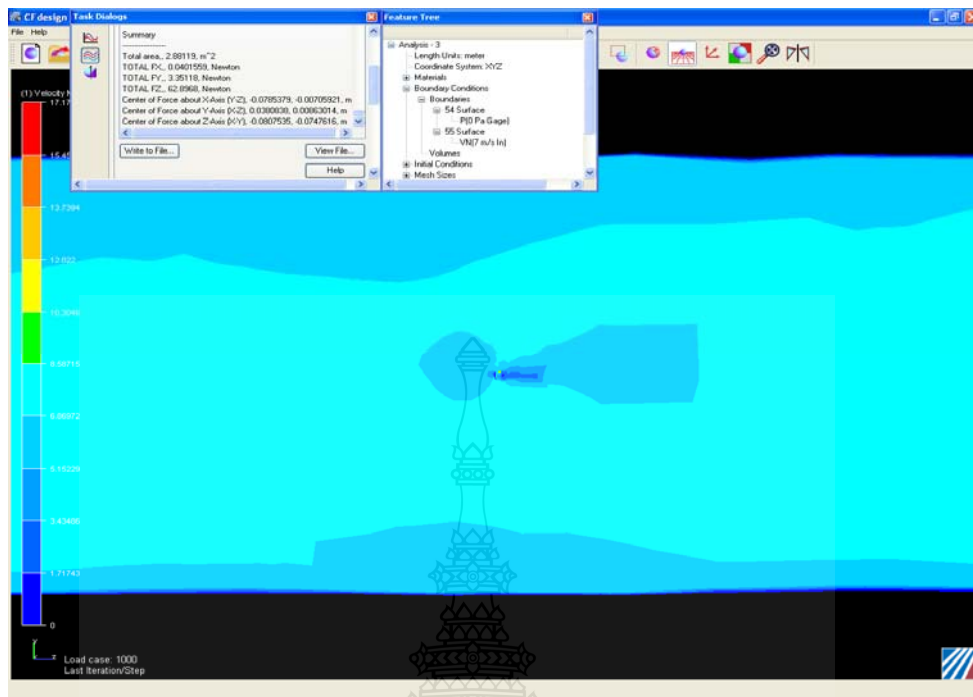
ภาพที่ จ.14 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 4 m/s



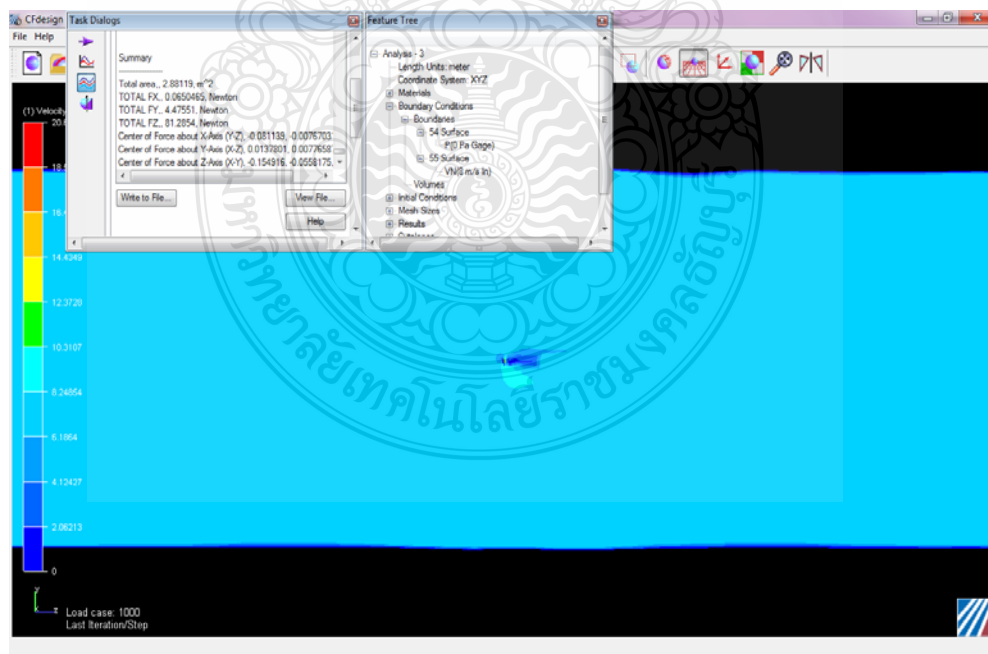
ภาพที่ จ.15 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 5 m/s



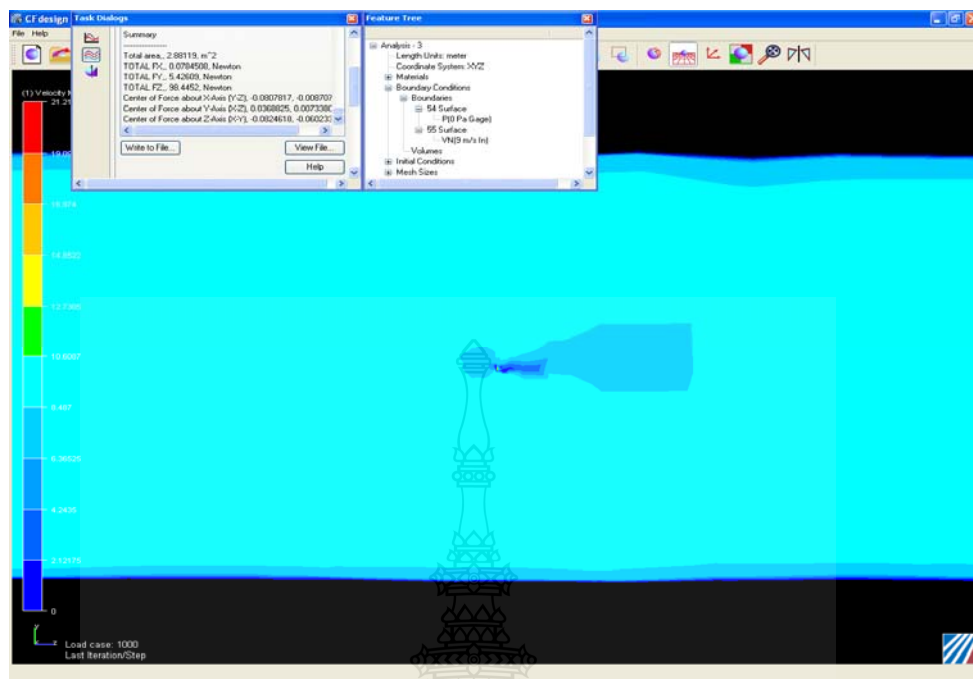
ภาพที่ จ.16 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 6 m/s



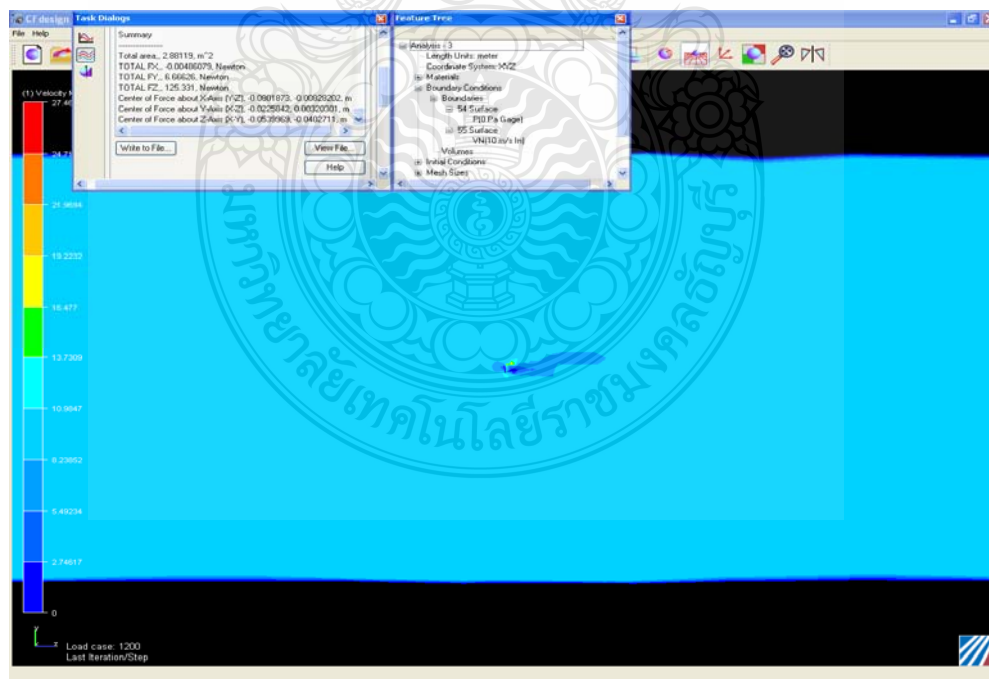
ภาพที่ จ.17 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 7 m/s



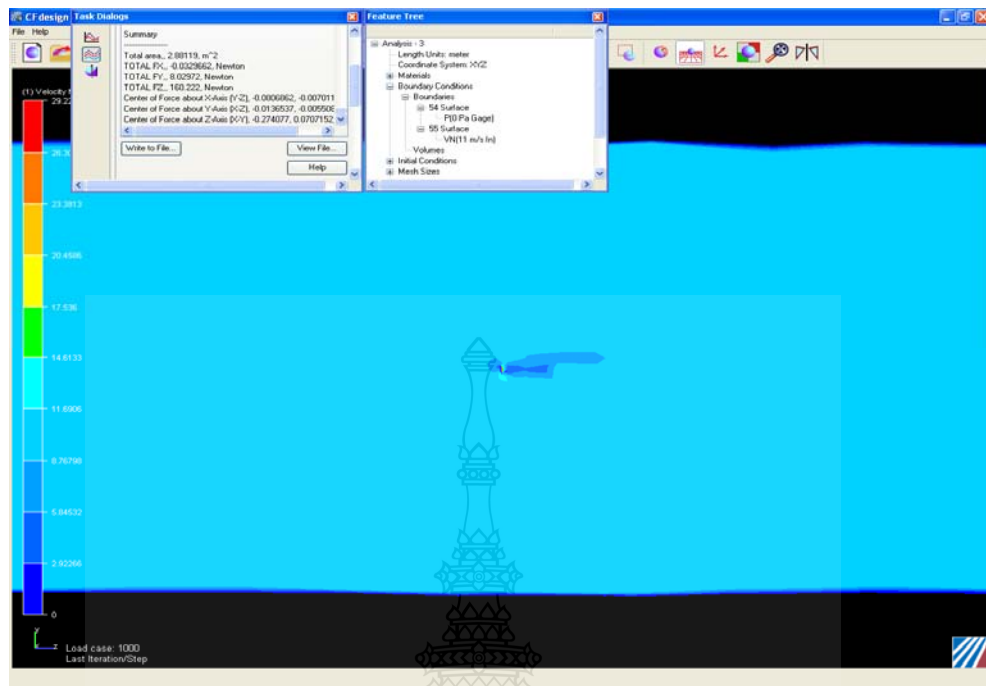
ภาพที่ จ.18 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 8 m/s



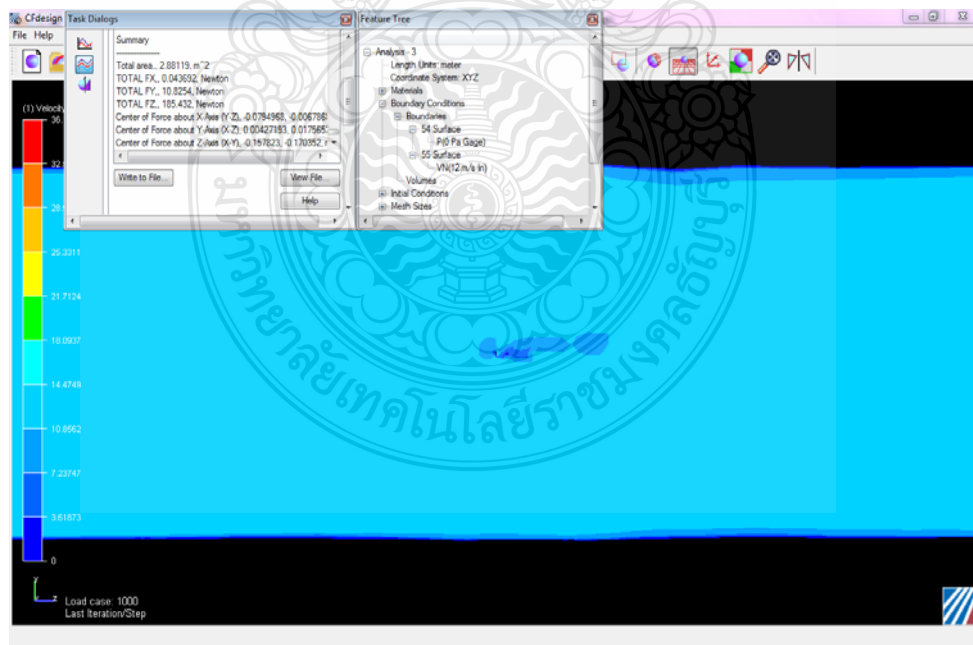
ภาพที่ จ.19 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 9 m/s



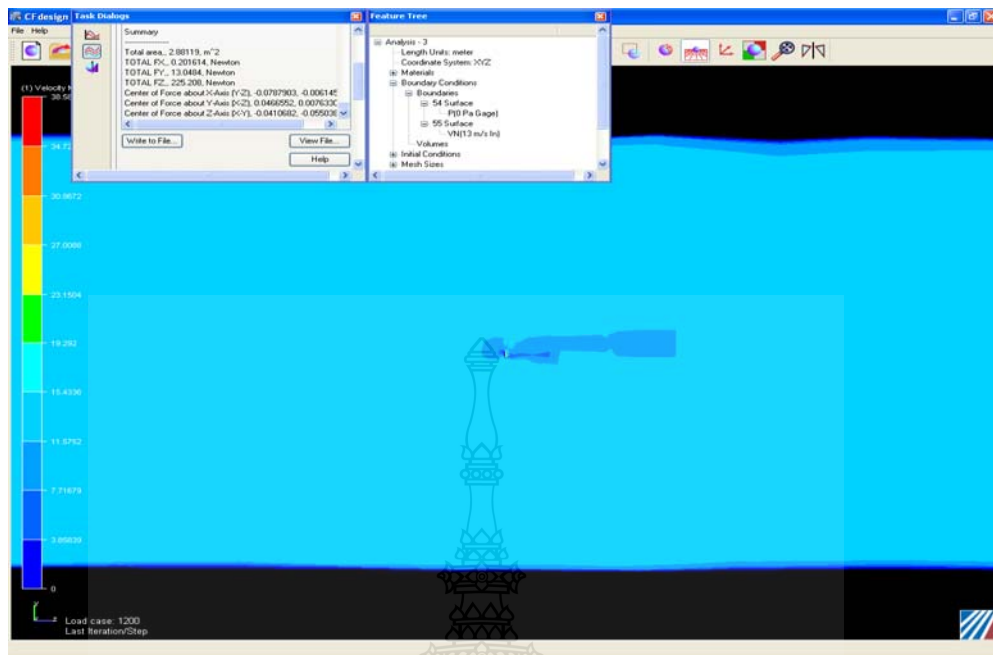
ภาพที่ จ.20 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 10 m/s



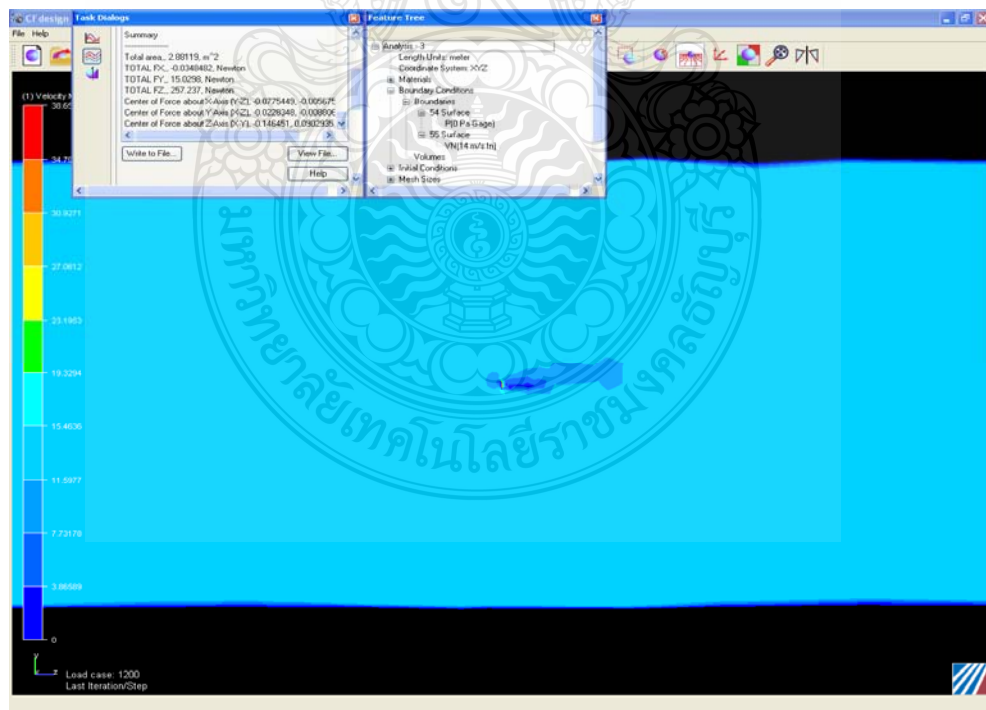
ภาพที่ จ.21 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 11 m/s



ภาพที่ จ.22 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 12 m/s

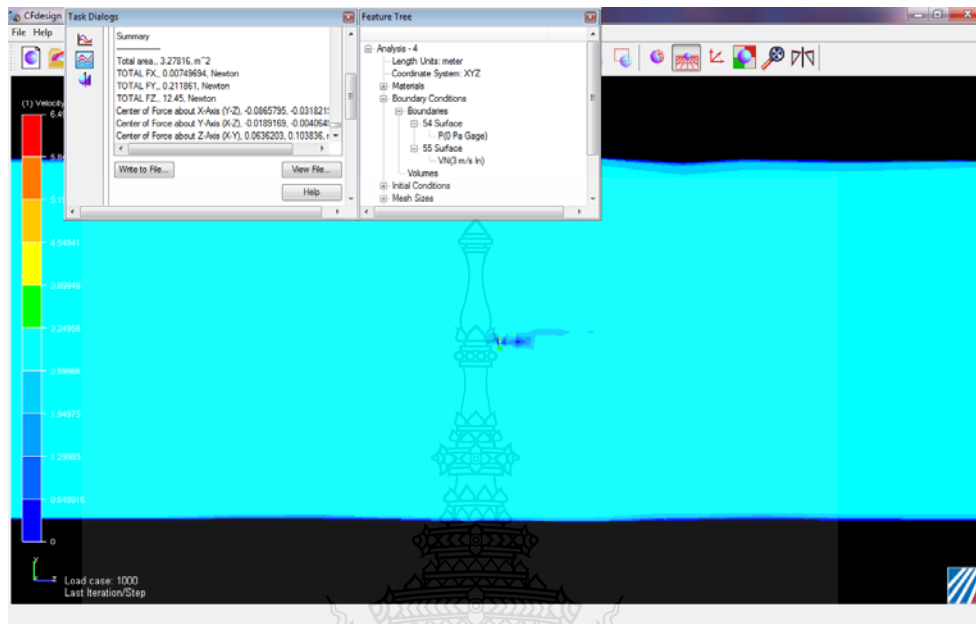


ภาพที่ จ.23 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 13 m/s

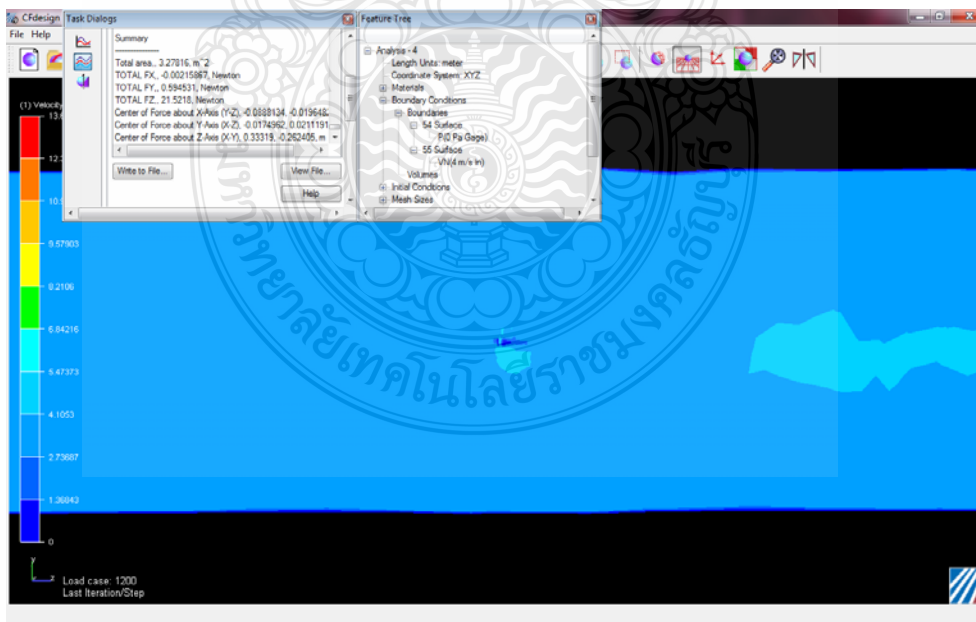


ภาพที่ จ.24 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 14 m/s

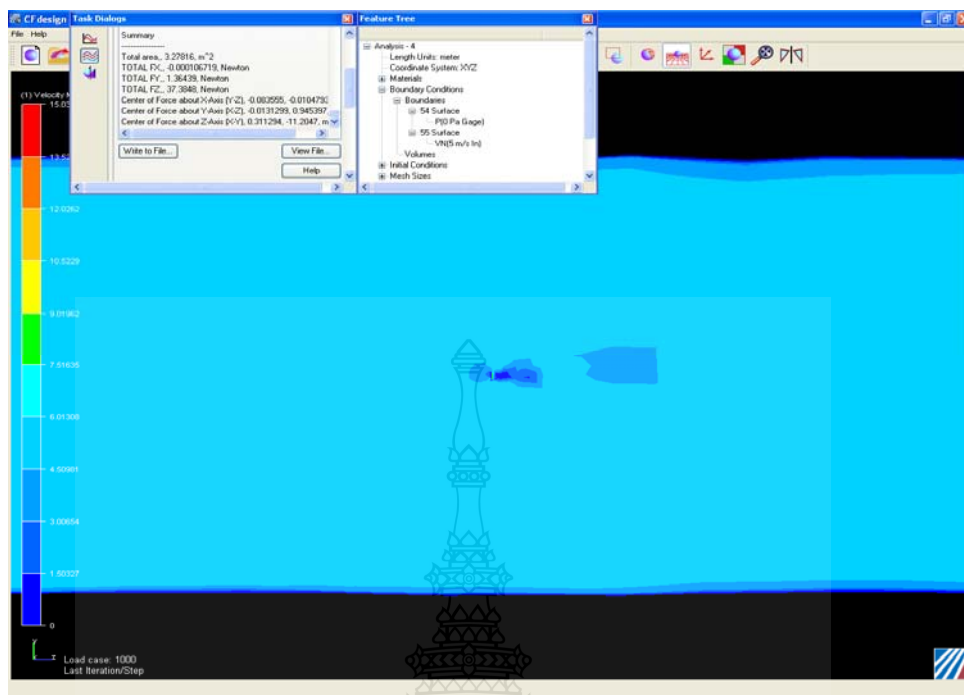
ผลวิเคราะห์ที่ใบกังหันขนาดความยาว 4.0 เมตร



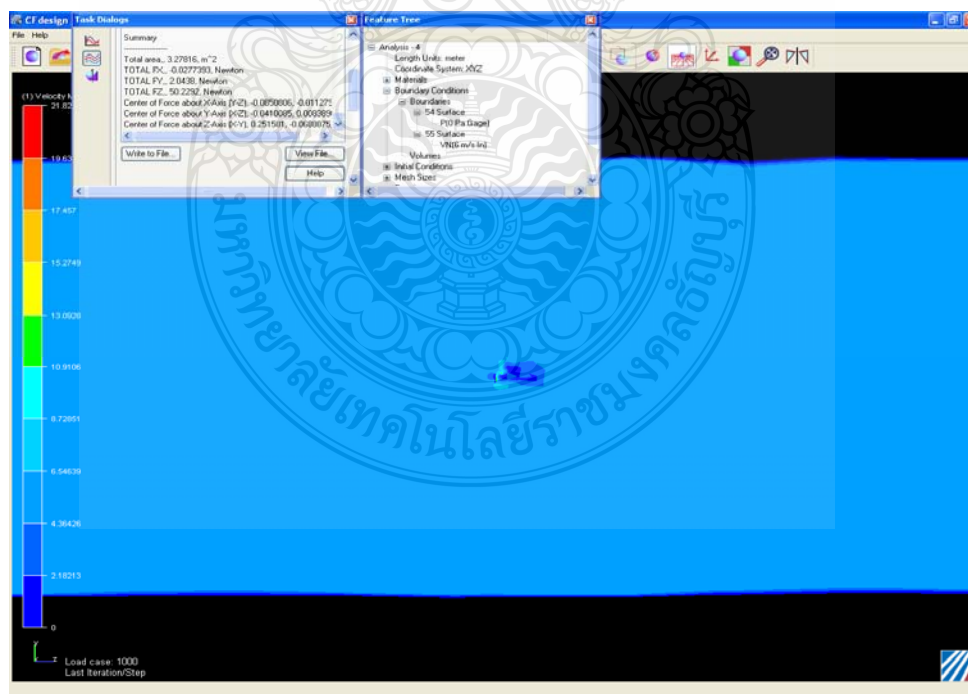
ภาพที่ จ.25 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 3 m/s



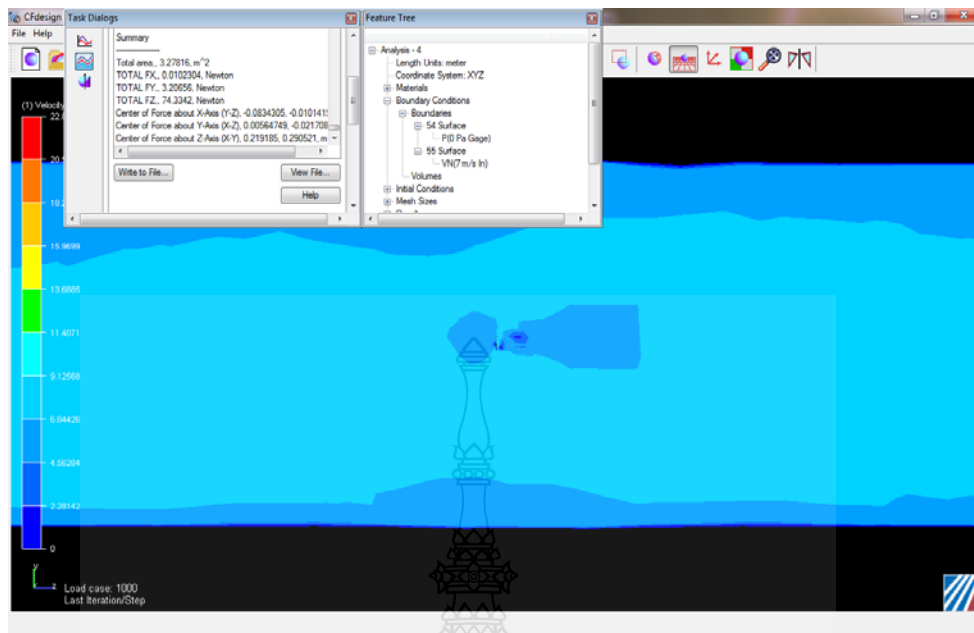
ภาพที่ จ.26 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 4 m/s



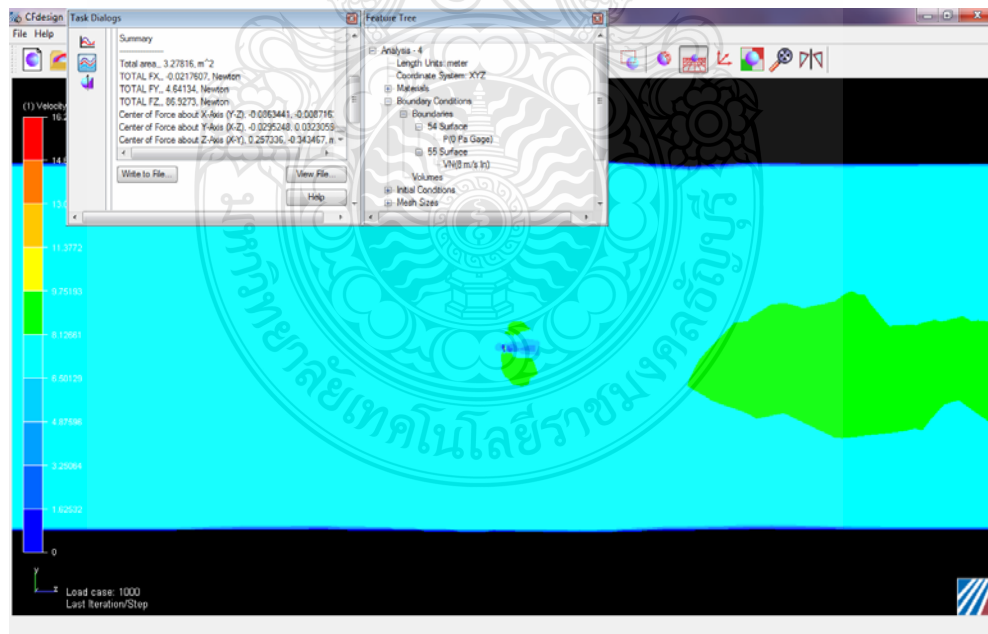
ภาพที่ จ.27 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 5 m/s



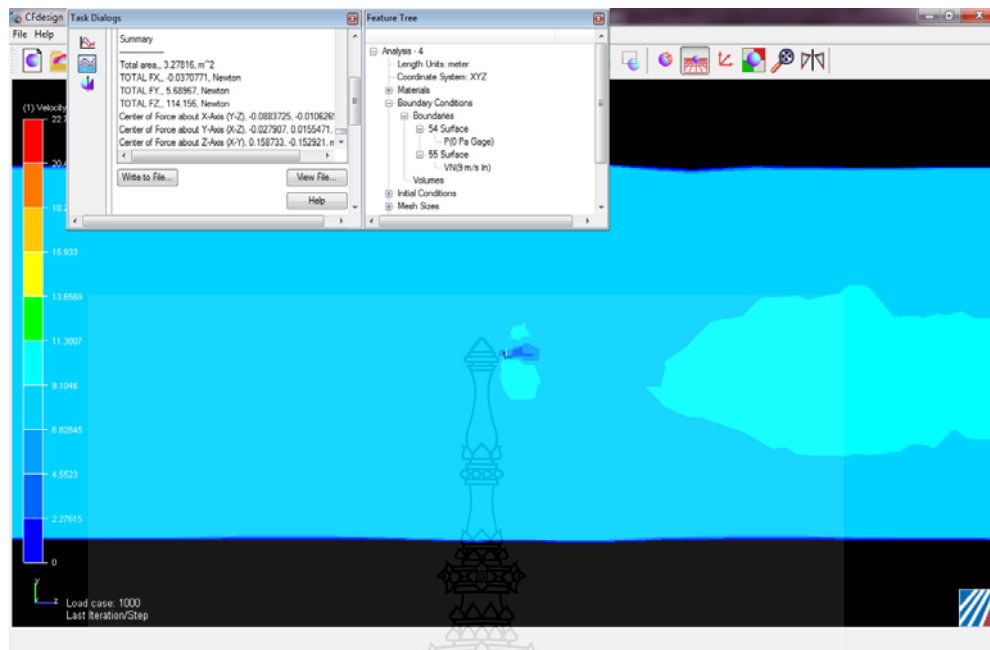
ภาพที่ จ.28 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 6 m/s



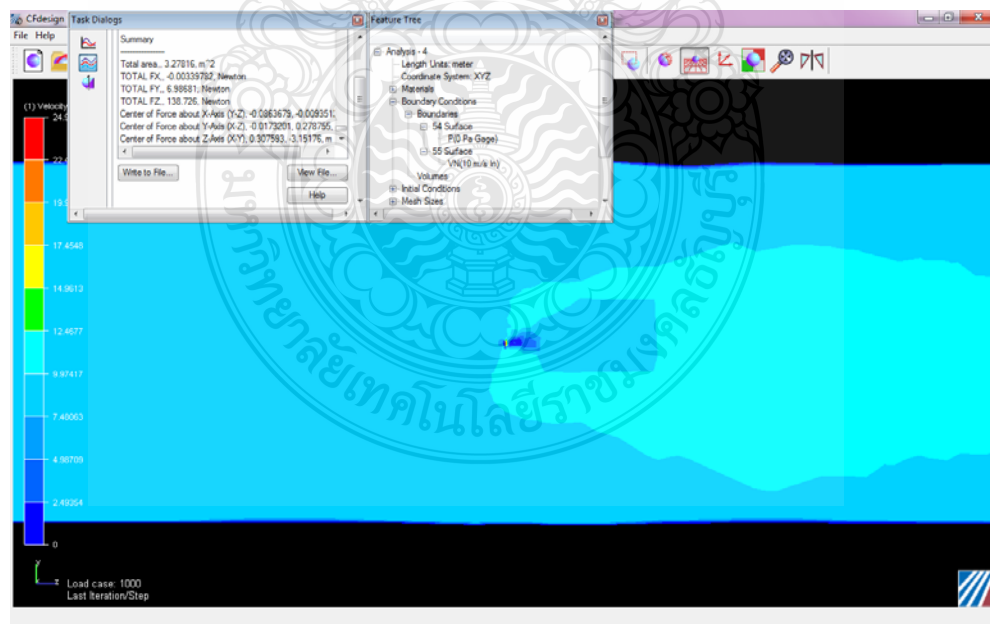
ภาพที่ จ.29 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 7 m/s



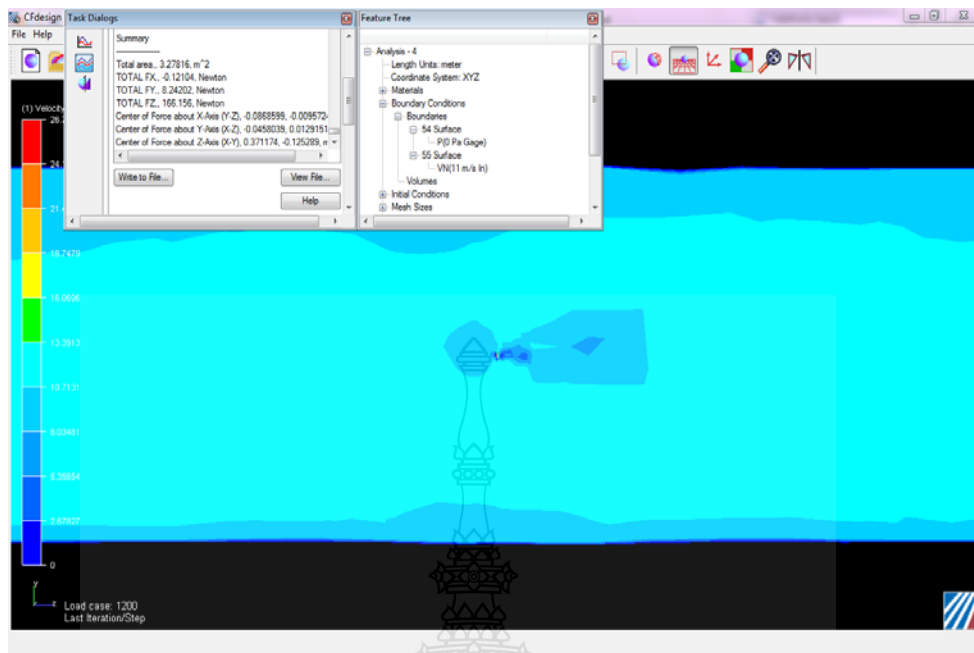
ภาพที่ จ.30 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 8 m/s



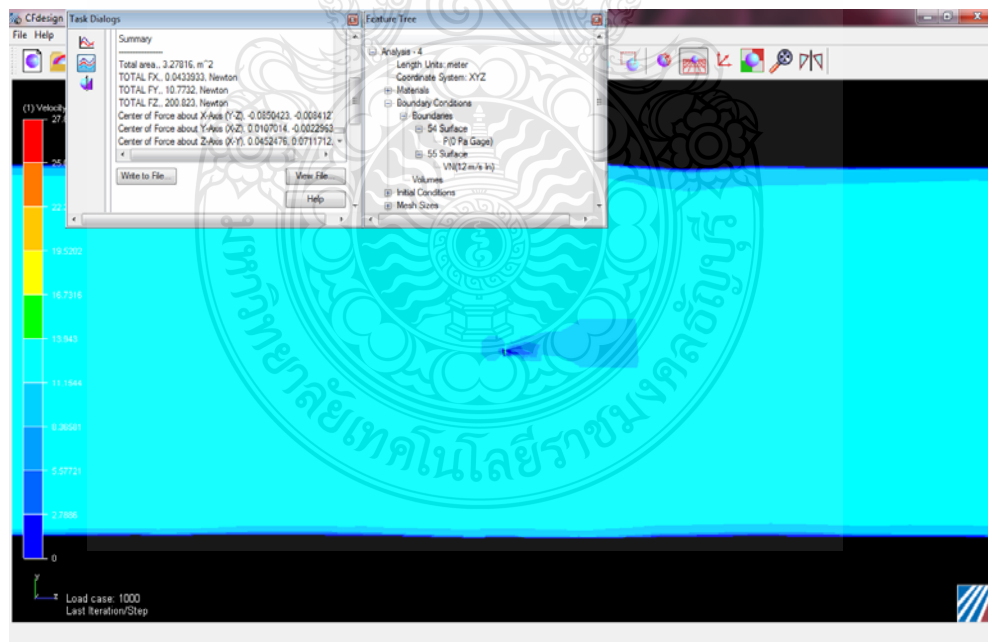
ภาพที่ จ.31 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 9 m/s



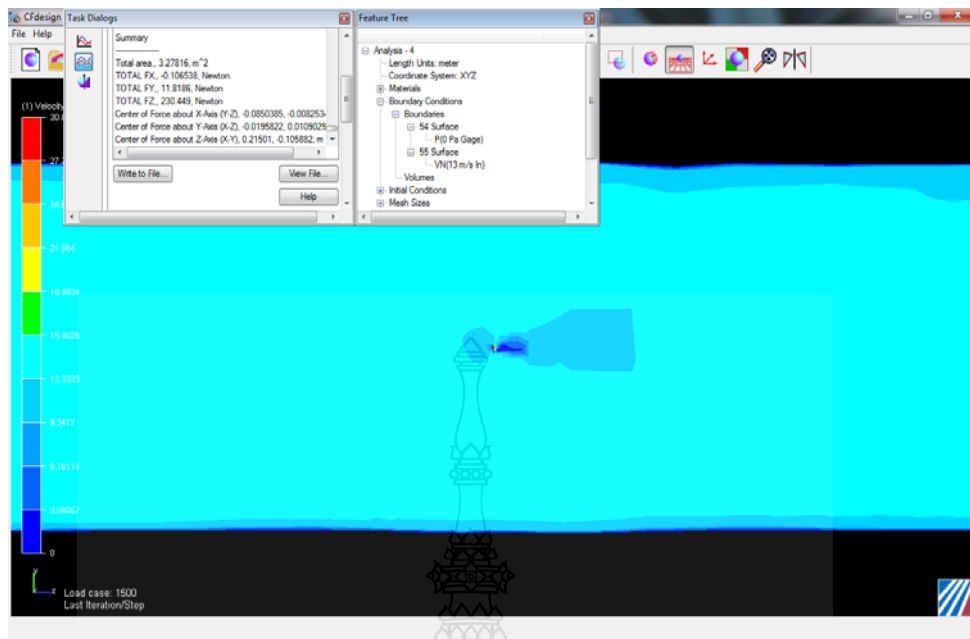
ภาพที่ จ.32 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 10 m/s



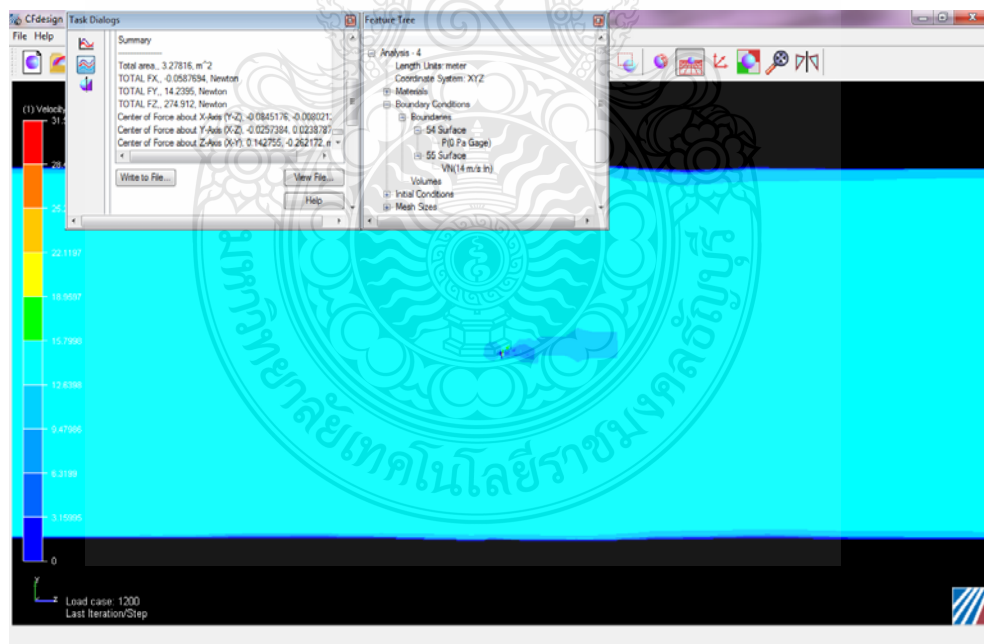
ภาพที่ จ.33 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 11 m/s



ภาพที่ จ.34 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 12 m/s



ภาพที่ จ.35 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 13 m/s

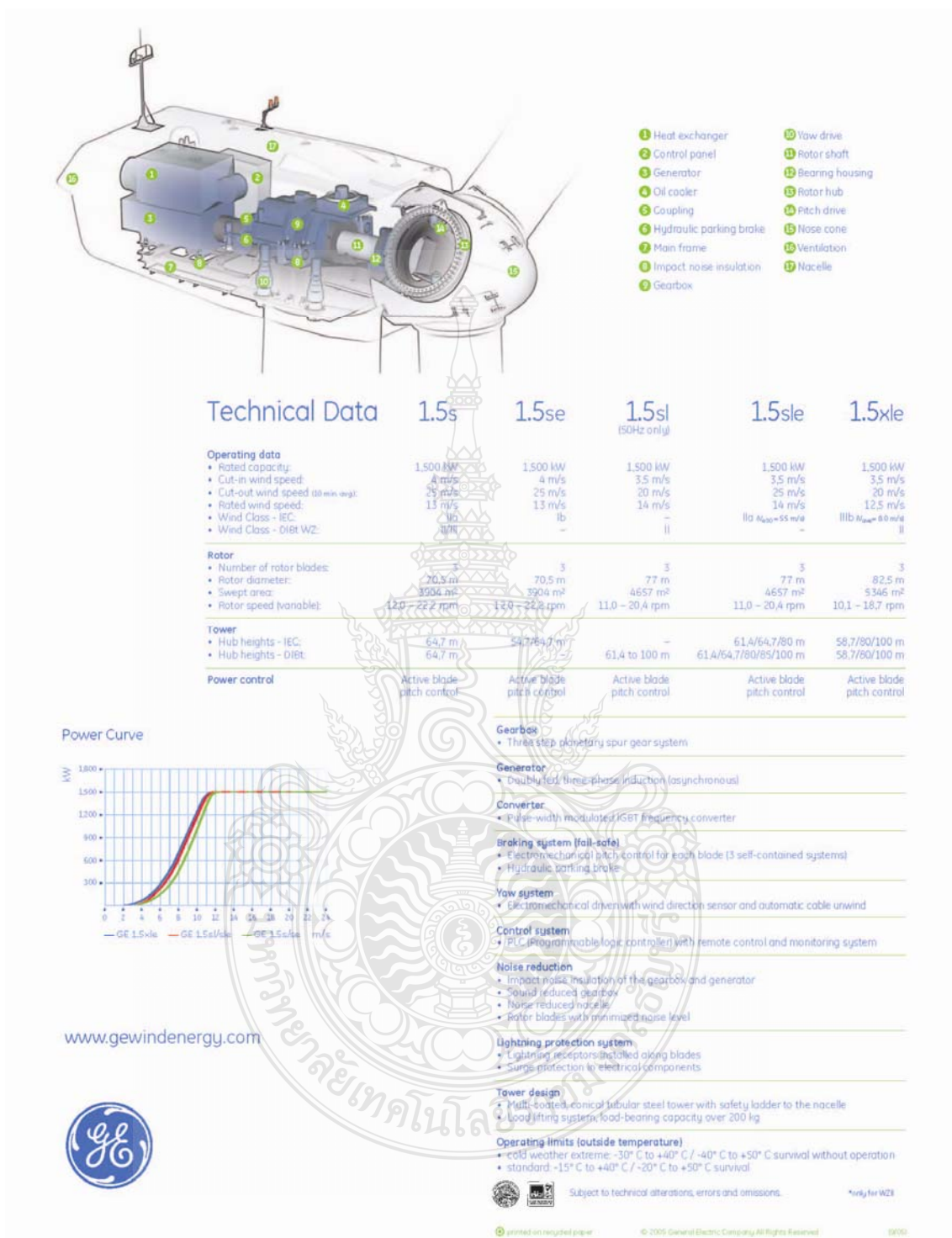


ภาพที่ จ.36 ผลวิเคราะห์ที่ความเร็วลม 14 m/s



ภาคผนวก ฉ

ตัวอย่างเทคโนโลยีกักเก็บลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW





ภาพที่ ๑.1 ตัวอย่างข้อมูลจำเพาะรุ่นกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW [21]

										
Main Data		aM 1.5/77	aM 1.5/83							
Rotor diameter	77 m	83 m								
Installed power	1500 kW	1500 kW								
Blade length	37,5 m	40,3 m								
Power control	pitch control	pitch control								
Operational mode	variable speed	variable speed								
Rated speed	18,5 rpm	17,4 rpm								
Presumed design life 1)	20 years	20 years								
IEC type class	TC2A+	TC3A								
Certification	GL guidelines certification of onshore WTG	GL guidelines certification of onshore WTG								
1) Relates to main components only and excludes any components that are subject to normal wear and tear.										
Generator-Converter System		Operation Data								
Electrical system	double fed induction or permanent magnet synchronous generator	Cut in wind speed (approx.)	3,5 m/s (60 s average)							
Protection class	Generator IP54	Cut out wind speed	25 m/s (10 min average)							
Converter voltage out	690 V	Ambient operation temperature, normal climate	plus 40 °C / minus 10 °C							
Frequency	50 Hz (or 60 Hz with PMSG)	Ambient operation temperature, hot climate	plus 45 °C / minus 10 °C							
Rated power	1500 kW	Ambient operation temperature, cold climate	plus 40 °C / minus 30 °C							
Pitch System		Rotor								
Pitch bearing	ball bearing slewing ring, internally geared	Number of blades	3							
Pitch drives	AC or DC motors, planetary gearboxes	Blade material	GFRP							
		Tilt angle	4°							
		Cone angle	3,5°							
Drive Train		Yaw System								
Principle	2 bearing arrangement	Type	active yaw system							
Main bearing	cylindrical roller bearing & tapered roller bearing	Yaw drives	2 motors with planetary gearboxes							
Gearbox type	3-stage planetary/spur comp.	Yaw brake	4 hydraulic callipers with brake disk							
Tower		Weight/Masses								
Height (hub height)	70 m, 80 m (other hub heights on request)	Rotor incl. hub	approx. 31 000 kg (aM 1.5/77)							
Type	tubular conical steel segments	Nacelle	approx. 31 500 kg (aM 1.5/83)							
Material	S235/S355 construction steel	Tower	approx. 61 500 kg							
Access	internal climbing system with optional elevator	Foundation	depending on hub height							
			depending on soil condition, flat or pile foundation							
Calculated Power Curve given for DFIG and air density of 1,225 kg/m ³										
Wind speed (m/s)	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0-25,0	
aM 1.5/77 Power (kW)	32,8	127,6	240,2	400,2	618,9	888,8	1192,4	1500,0	1500,0	
aM 1.5/83 Power (kW)	49,1	152,7	282,7	468,4	719,0	1008,4	1320,4	1500,0	1500,0	
Disclaimer: All numbers and figures are preliminary, indicative and subject to change. Nothing in this product brochure shall be understood or construed to be or to create an express or implied warranty or guarantee in respect of the product described here in.										
Headquarters: aerodyn Energiesysteme GmbH - Provanthausstraße 9 - 24768 Rendsburg, Germany phone: +49-(0) 43 31-1275-0 - fax: +49-(0) 43 31-1275-55 - e-mail: info@aerodyn.de - internet: www.aerodyn.de										

ภาพที่ จ.2 ตัวอย่างข้อมูลจำเพาะรุ่นกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW [22]

ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





โครงการการสัมมนาเชิงวิชาการครั้งที่ ๔ “รูปแบบพลังงานทดแทนชุมชนแห่งประเทศไทย”

4 th Thailand Renewable Energy Community Configuration Congress

๒๘ – ๓๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๔

กลุ่มของผลงาน

กลุ่มที่ ๑ เทคโนโลยีพลังงานชุมชน

กลุ่มที่ ๒ การจัดการพลังงานชุมชน

กลุ่มที่ ๓ ธุรกิจพลังงานชุมชน

กลุ่มที่ ๔ วิสาหกิจชุมชน



40 ปี เพื่อพัฒนาที่ก้าวไกล...
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

ณ อาคารโอพาร์ โรจน์ หิรัญจน์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ ๔

“รูปแบบพลังงานทดแทนของชุมชนแห่งประเทศไทย” ประจำปี ๒๕๕๔

<u>ชื่อ</u>	<u>นามสกุล</u>	<u>มหาวิทยาลัย/สถาบัน</u>
ศ.ดร. ทานงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร. วัฒนพงศ์	รักษ์วิเชียร	มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร. ศิริชัย	เทพา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. นริส	ประทีนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. ศุภวิทย์	ลวณะสกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร. สมชาย	มณีวรรณ์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผศ.ดร. ศิรินุช	จินดารักษ์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผศ.ดร. นิพนธ์	เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผศ.ดร. ดิเกะ	บุญภาค	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร. นุภาพ	แย้มไกรพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ดร. บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. วีรชัย	โรยรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร. อชิตพล	ศศิธรานุวัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตต์
รศ.ดร. วิลาศ	พุ่มพิมล	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. อภิรักษ์	ชัยเสนา	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. หฤทัย	ไทยสุชาติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. นงลักษณ์	สายเทพ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. สิริพิศ	พิศชวนชม	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. พิสิษฎ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ดร. จันทนา	กฤษรวิรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. อ่ำพล	อวารณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. วิทยา	พวงสมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร. วเรศ	วีระสัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร. กิตติศักดิ์	สมุทรธารักษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. ประสงค์	อัครพูน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร. บุญล้ำ	สุนทร	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ดร. วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ผ่องศรี	ศิวราศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. สโรชา	เจริญวัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. สตาพร	ทองวิค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ ๔

“รูปแบบพลังงานทดแทนของชุมชนแห่งประเทศไทย” ประจำปี ๒๕๕๔

<u>ชื่อ</u>	<u>นามสกุล</u>	<u>มหาวิทยาลัย/สถาบัน</u>
ดร. จักรี	ศรีนันทน์จักร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. ณรงค์ชัย	โอเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. กฤษณไชยม์	ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. สุนนมาลัย	เนียมกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร. รัฐภูมิ	พรหมณะ	มหาวิทยาลัยพะเยา
Ph.D. Larry	Kreiser	Cleveland State University.
รศ.ดร. มนตรี	พิริยะกุล	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร. บัณฑิต	ผ่องนรินทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
รศ.ดร. บุญทวรรณ	วิงวอน	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
รศ.ดร. อารวณ	โอกาสพัฒนกิจ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
รศ.ดร. ถวิล	นิลใบ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. พรชนก	ทองลาด	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ. กาญจนา	คума	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ. สุวรรณี	โพธิศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. เกรียงวัลย์	วงษ์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. ไพฑูรย์	อินตะชนัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร. ธนกร	น้อยทองเล็ก	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. ปองปรารถน์	สุนทรเกษม	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

สารบัญ

บทความ

หน้า

ET012	การวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1.5 MW อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช พินิจ สังข์ทอง วิรัชย์ โรยนรินทร์.....	77
ET013	เครื่องบันทึกข้อมูลไร้สายพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้โปรโตคอลแบบโพลลิง ธงชัย มณีชูเกตุ นกคณ สีสุข สุภาวดี สุพระมิตร ศิริรุช จินดารักษ์.....	85
ET014	การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพื่อความเหมาะสมต่อพื้นที่ใช้งาน คิลปชัย เพิ่มพูล วิรัชย์ โรยนรินทร์.....	95

กลุ่มที่ 2 การจัดการพลังงานชุมชน (EM)

EM001	การประเมินทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบไฟฟ้าจากพลังงานลม แบบเชื่อมต่อสายส่งขนาด 2.5 MW. ณ ลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา ปรัชญา สิมังกูร สหทัยา ทองสาร นีพันธ์ เกตุจ้อย.....	103
EM002	การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์.....	111
EM003	การถ่ายทอดเทคโนโลยีป้อนหมักก๊าซชีวภาพแบบโถงและการประยุกต์ใช้ในครัวเรือน พิสิษฐ์ มณีโชติ ธนัทโชค แก้วกันยา วิกานต์ วันสูงเนิน.....	121
EM004	การผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติเพื่อลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในโรงงานอุตสาหกรรม กรณีศึกษา: โอที ดาต้าเมนูเฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด โชคทวี นนท์ไพลย์ บุญยงค์ ปลั่งกลาง วินัย คำทวี.....	127
EM005	การวิเคราะห์ด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์พลังงานน้ำทำนองที่มีการก่อสร้างระบบกักน้ำ ร่วมกับระบบไฮบริดจ์สำหรับใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าในพื้นที่ภาคเหนือ ไตรรัตน์ ปะที กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์.....	137
EM006	การพัฒนาเตาแก๊สชุมชนเพื่อใช้ในครัวเรือน สมานชัย นุกุลเสาวลักษณ์ พิสิษฐ์ มณีโชติ ศรายุทธ วิญูฒิ สหทัยา ทองสาร.....	143
EM007	การศึกษาวัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้ในรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ดรุณี สิงห์คะนอง ภานรุจ บุญทองงาม มณี กาญจนกรหิรัญ ประพิชารีย์ ธารักษ์.....	151

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4
28 - 30 พฤศจิกายน 2554 มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

การวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1.5 MW

อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช

Analysis of Potential Electricity Generation from Wind Turbine 1.5 MW

At Hua Sai, Nakhon Si Thammarat

ET012

พินิจ สังข์ทอง วิชาญ ROYNINONT

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3497 โทรสาร 0-2549-3432 E-mail: pinij_sung@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาด 1.5 MW ที่ติดตั้งอยู่ที่ อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จริงในแต่ละเดือน และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในรอบ 1 ปี เพื่อหาค่าตัวประกอบกำลังผลิต Capacity Factor (CF) ของกังหันลม ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลของ อำเภอหัวไทร ช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึงเดือนมิถุนายน 2553 มีความเร็วลมเฉลี่ยรายปี 4.79 เมตรต่อวินาที จากข้อมูลที่ทำการศึกษาเก็บบันทึกการผลิตพลังงานไฟฟ้าในรอบ 1 ปี กังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 1,505,502 หน่วย มีค่า CF อยู่ที่ 11.46 % และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลัง Power Coefficient (C_p) สูงสุดเท่ากับ 0.4 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที

คำสำคัญ: ตัวประกอบกำลังผลิต, สัมประสิทธิ์กำลัง, ความเร็วลมเฉลี่ย

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานมีปริมาณสูงขึ้นทุกปีเนื่องมาจากการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและสังคม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ซึ่งส่งผลให้ความต้องการพลังงานเพื่อนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย วิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานนับเป็นปัญหาสำคัญระดับชาติที่ต้องดำเนินการแก้ไขอย่างเร่งด่วน รวมไปถึงการวางแผนอย่างรอบคอบในระยะยาว เพื่อเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานของประเทศ แหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยส่วนใหญ่มาจาก ก๊าซธรรมชาติ และ ถ่านหิน ซึ่งพลังงานเหล่านี้ถือเป็นพลังงานสิ้นเปลือง เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป นอกจากนี้พลังงานที่มาจากฟอสซิล ยังก่อให้เกิดมลภาวะ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม ทั้งยังเป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน

พลังงานหมุนเวียนจากธรรมชาติจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยในการแก้ปัญหาวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงาน รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ที่ต้องสนับสนุนส่งเสริมและพัฒนาอย่างจริงจัง พลังงานลม เป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มีการพัฒนาให้มีขีดความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้ในระดับเมกะวัตต์ ปัจจุบันมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ และติดตั้งสำหรับการผลิตไฟฟ้าในหลายประเทศ ส่วนใหญ่อยู่ในทวีปยุโรป อเมริกาเหนือรวมถึงทวีปเอเชีย ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความเร็ว ลมค่อนข้างต่ำ แต่จากการศึกษาพบว่าบางพื้นที่ที่มีศักยภาพที่สามารถติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ ซึ่งกรมพัฒนา พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้ดำเนินการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้ากำลังผลิตขนาด 1.5 MW ที่อำเภอหัวไทร จังหวัด นครศรีธรรมราช เป็นโครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เป็นโครงการนำร่องสำหรับพัฒนาไปสู่การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในอนาคต นำความมั่นคงทางด้านพลังงานสู่ชุมชน และเป็นการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม ในพื้นที่แหล่งลมดีของประเทศไทย

2. กำลังงานของลม

กำลังงานของลมที่พัดผ่านพื้นที่ A ในแนวตั้งฉาก ด้วยความเร็ว v จะมีค่าตามสมการ

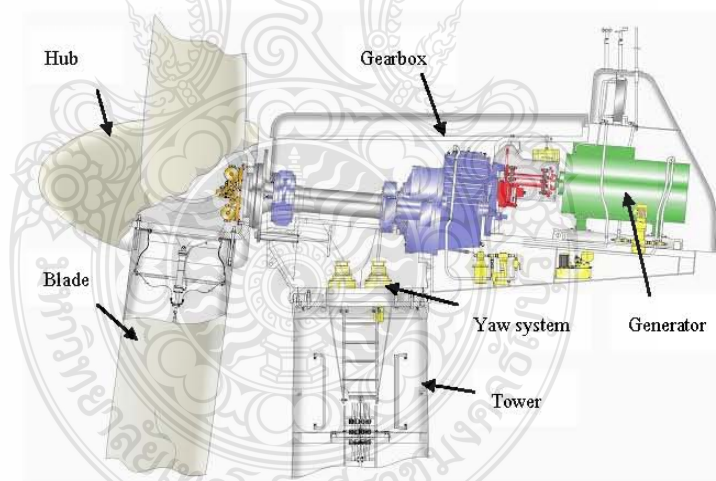
$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ ที่มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และถ้าให้อากาศที่มีความหนาแน่น ρ ไหลผ่านกังหันลมที่มีพื้นที่กวาดของใบ A (Swept area) กำลังงานที่ได้จากกังหันลมจะเป็นตามสมการ

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

โดย C_p คือค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) เป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงประสิทธิภาพของกังหันลม ในการเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์จากลมให้เป็นพลังงานกล ซึ่งกำลังงานที่กังหันลมสกัดได้จริงนั้นจะแปรผันตามค่า C_p ทั้งนี้ตามทฤษฎีของ Betz กังหันลมจะมีค่า C_p สูงสุดได้ไม่เกิน 0.592

3. ส่วนประกอบหลักของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่



รูปที่ 1 ส่วนประกอบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถแบ่งส่วนประกอบของชุดกังหันลมออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ระบบทางกล ประกอบด้วย ใบพัด โรเตอร์ฮับ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์จากลมให้เป็นพลังงานกล โดยส่งกำลังผ่านเพลาไปขับชุดเฟืองทด (Gear Box) ซึ่งจะเพิ่มความเร็วยกกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากชุดเฟืองทจะมีชุด coupling ที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชุดเฟืองทดและชุด coupling จะถูกเรียกรวมกันว่า Drive train โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามถึงชุดควบคุมและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะติดตั้งอยู่ภายในห้องเครื่อง (Nacelle) ซึ่งติดตั้งอยู่บนเสา (Tower) ที่มีความสูงที่เหมาะสมกับขนาดของกังหันลม มีระบบยอร์ (Yaw System) ทำหน้าที่ปรับทิศทางของนาเซล ให้หันเข้าหาทิศทางลม เพื่อให้

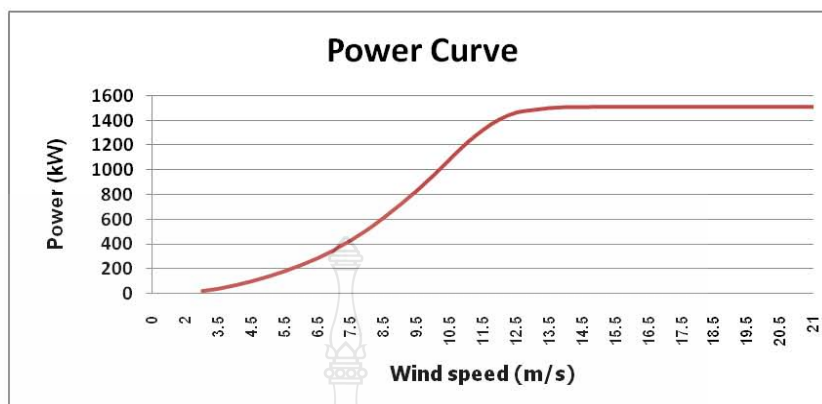
ใบของกังหันรับกำลังลมได้สูงสุด ส่วนระบบทางด้านไฟฟ้า จะประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบควบคุมทั้งหมดของกังหันลม มีอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วลมและทิศทางลมติดตั้งอยู่ด้านบนของนาเซล เป็นอุปกรณ์ที่สั่งให้กังหันลมหยุดทำงานในกรณีที่มีความเร็วลมเกินพิกัด และสั่งให้ระบบย่อยปรับทิศทางของนาเซล

4. รายละเอียดทางเทคนิคของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW อำเภอหัวไทร

เส้นผ่านศูนย์กลางใบ (Diameter)	77	เมตร
พื้นที่กวาดของใบ (Swept area)	4,657	ตารางเมตร
จำนวนใบ	3	เมตร
ความเร็วลมเริ่มผลิตไฟฟ้า (Cut-in)	3	เมตร/วินาที
ความเร็วลมหยุดทำงาน (Cut-out)	21	เมตร/วินาที
ความเร็วลมที่ผลิตกำลังงานสูงสุด (Rated wind)	11.5	เมตร/วินาที
ความสูงของตอมกังหัน (Hub Height)	80	เมตร
ชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	Asynchronous	



รูปที่ 2 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW อำเภอหัวไทร



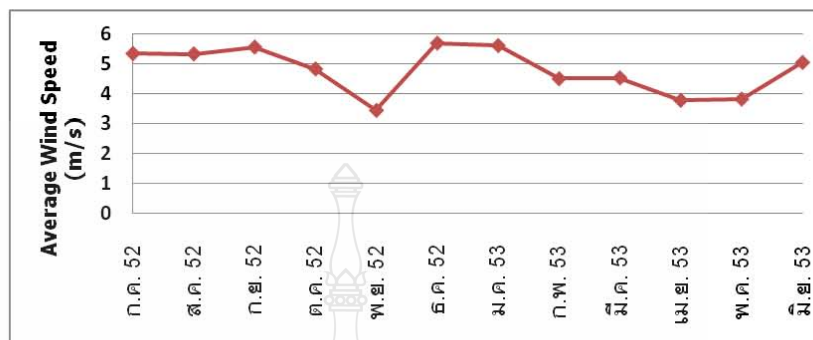
รูปที่ 3 Power Curve ของกังหันลม

5. ศักยภาพพลังงานลมของอำเภอหัวไทร

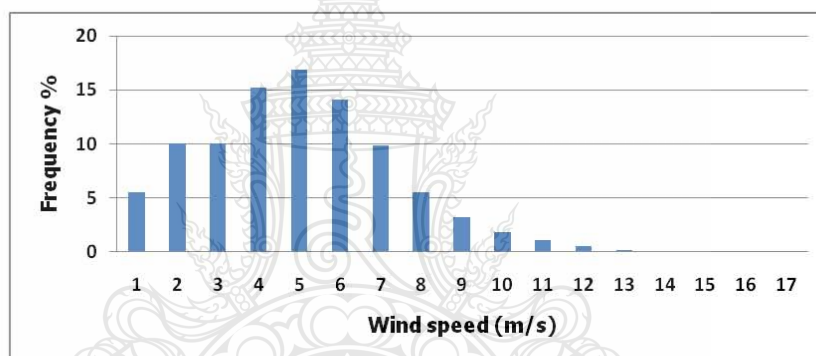
ข้อมูลลมและข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะถูกเก็บบันทึกโดยใช้ระบบ SCADA ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้เป็นระบบควบคุมและเก็บบันทึกข้อมูลสำหรับระบบสมัยใหม่ การบันทึกข้อมูลโดยระบบ SCADA จะบันทึกข้อมูลที่สำคัญต่างๆ ของกังหันลมลงในฐานะข้อมูลของระบบ ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลต่างๆ ย้อนหลังได้ เป็นประโยชน์ในการเดินเครื่องและบำรุงรักษา สำหรับข้อมูลลมที่นำมาใช้วิเคราะห์และพิจารณา คือช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึง เดือนมิถุนายน 2553 เนื่องจากข้อมูลมีความต่อเนื่องและสมบูรณ์ที่สุด ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนของอำเภอหัวไทร ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วลมเฉลี่ยส่วนใหญ่จะสูงกว่า 4.5 เมตรต่อวินาที และจากการแจกแจงความถี่ความเร็วลม ก็จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความถี่การกระจายตัวของความเร็วลมส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 4-5 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 1 ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน

เดือน / ปี	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)
กรกฎาคม 52	5.35
สิงหาคม 52	5.34
กันยายน 52	5.57
ตุลาคม 52	4.83
พฤศจิกายน 52	3.43
ธันวาคม 52	5.70
มกราคม 53	5.62
กุมภาพันธ์ 53	4.50
มีนาคม 53	4.53
เมษายน 53	3.77
พฤษภาคม 53	3.81
มิถุนายน 53	5.05
เฉลี่ย	4.79



รูปที่ 4 กราฟความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน



รูปที่ 5 เปรี่เซ็นต์ความถี่การกระจายตัวของความเร็วลม

6. ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม

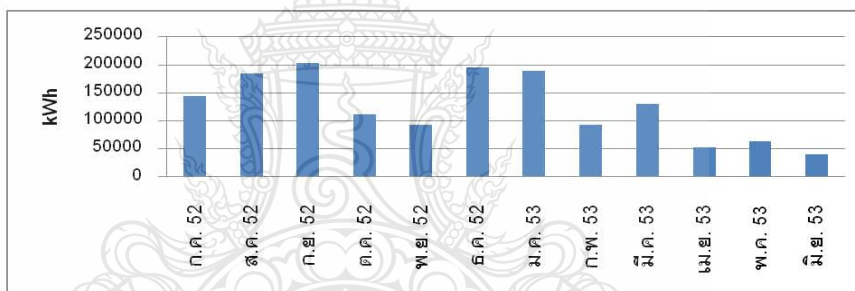
การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบ 1 ปี หรือ Annual Energy Production (AEP) นั้น ทำได้โดยการนำพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่กังหันลมสามารถผลิตได้จริงในแต่ละเดือนมาบวกรวมกัน ซึ่งการวิเคราะห์ครั้งนี้จะใช้ข้อมูลที่อยู่ในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2552 ถึงเดือนมิถุนายน 2553 มาพิจารณา โดยกังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 1,505,502 หน่วย ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในแต่ละเดือน

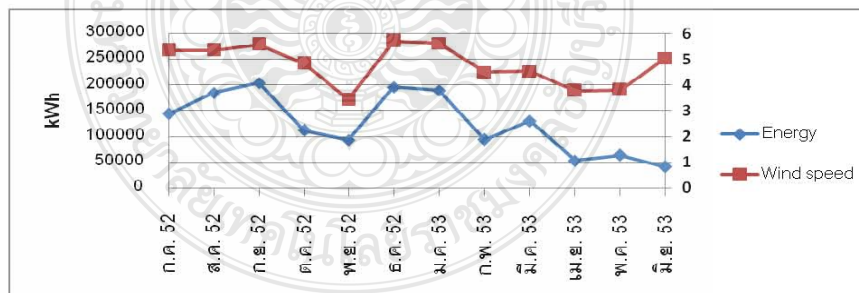
เดือน / ปี	พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ (kWh)
กรกฎาคม 52	144,029
สิงหาคม 52	184,720
กันยายน 52	204,128
ตุลาคม 52	111,694

ตารางที่ 2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กักหน้ลผลิตได้ใหม่แต่ละเดือน

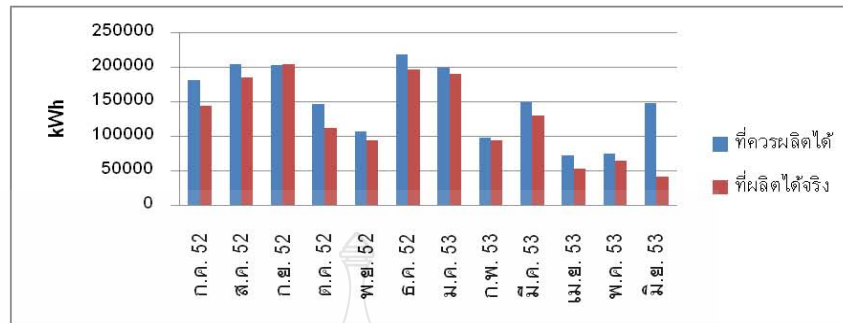
เดือน / ปี	พลังงานไฟฟ้าที่กักหน้ลผลิตได้ (kWh)
พฤศจิกายน 52	93,356
ธันวาคม 52	196,143
มกราคม 53	189,742
กุมภาพันธ์ 53	93,925
มีนาคม 53	129,839
เมษายน 53	53,015
พฤษภาคม 53	63,955
มิถุนายน 53	40,956
AEP	1,505,502



รูปที่ 6 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กักหน้ลผลิตได้จริงในแต่ละเดือน



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กักหน้ลผลิตได้กับความเร็วมเฉลี่ย



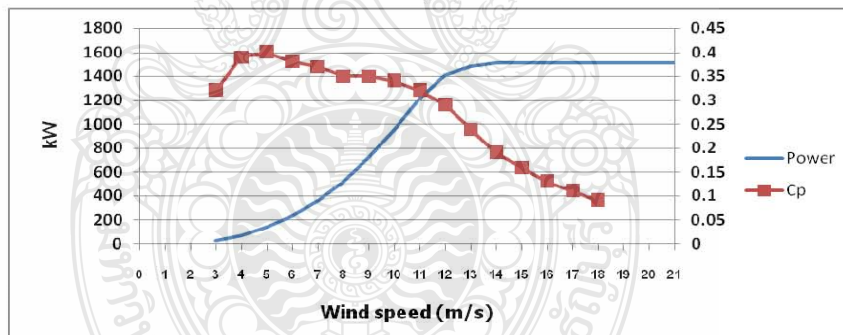
รูปที่ 8 เปรียบเทียบพลังงานที่กังหันลมควรผลิตได้จากการคำนวณและที่ผลิตได้จริง

จากตารางที่ 2 สามารถคำนวณหาค่า Capacity Factor (CF) ได้ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่าง Annual Energy Production (AEP) ที่ได้จริง กับพลังงานที่ได้เมื่อกังหันลมทำงานที่ Rated Power ในรอบ 1 ปี ตามสมการ

$$CF(\%) = 100 \times \frac{AEP}{(RatedPower \times 365 \times 24)} \quad (3)$$

$$CF(\%) = 100 \times \frac{1,505,502}{(1500 \times 365 \times 24)} = 11.46\%$$

จากการคำนวณ ได้ค่าตัวประกอบกำลังการผลิตของกังหันลม (CF) เท่ากับ 11.46%



รูปที่ 9 Power Coefficient ของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมมีความสอดคล้องกับความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละเดือน ซึ่งส่วนใหญ่มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงกว่า 4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเดือนที่มีความเร็วลมเฉลี่ยต่ำกว่า 5 เมตรต่อวินาที ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จะไม่ดีเท่าที่ควร สำหรับเดือนมิถุนายน มีการหยุดเดินเครื่องและตรวจสอบการทำงานของระบบประมาณ 15 วัน ทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมต่ำกว่าที่ควรจะเป็นมาก รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่กังหันลมควรผลิตได้และที่กังหันลมผลิตได้จริง โดยพลังงานที่กังหันลมควรผลิตได้จะคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของความเร็วลมในแต่ละเดือนกับ Power curve ของกังหันลม ซึ่งจะเห็นว่าไม่แตกต่างกันมาก และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Coefficient (C_p) ของกังหันลมกับความเร็วลม ตามรูปที่ 9 พบว่า

กังหันลมจะทำงานโดยมีค่า C_p สูงสุดเท่ากับ 0.4 ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความถี่การกระจายตัวของความเร็วลมในอำเภอหัวไทร ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 4-5 เมตรต่อวินาที เช่นกัน

7. บทสรุป

จากการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่พอรับได้ ถึงแม้จะมีบางช่วงต้องหยุดเดินเครื่องเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบเป็นระยะๆ ทำให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่า CF ของกังหันลม หากเดินเครื่องได้เต็มที่ค่า CF จะสูงขึ้น และจากพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ 1,505,502 หน่วย สามารถลดการนำเข้าน้ำมันดิบได้ถึง 0.12 ktoe ต่อปี หรือประมาณ 120 ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ พลังงานทดแทนจากพลังงานลมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยแก้วิกฤตการณ์ทางด้านพลังงาน ลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งภาครัฐต้องส่งเสริมอย่างเป็นรูปธรรมต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานสำหรับข้อมูลในการเขียนบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] การศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- [2] การศึกษาประเมินศักยภาพพลังงานลมในการผลิตไฟฟ้าเฉพาะแหล่ง, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- [3] J.F. Manwell, J.G. Mcgowan, A.L. Rogers, "Wind Energy Explained" John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, UK, 2009
- [4] David A. Spera, "Wind Turbine Technology" ASME, Three Park Avenue, New York, USA, 2009



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
 อ.จันทบุรี อ.จันทบุรี จ.จันทบุรี
 โทรศัพท์ 0-4375-4321-40 โทร 3010-3058



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รศ.ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร. ฐานิตย์ เมธิยานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร. ณ์ฐิติ์ กาศยปนนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. นรินทร์ วัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร. มานะ อมรกิจบำรุง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สมเกียรติ ประชญาวารการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. อติศักดิ์ นาถกรณกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สัมพันธ์ ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. เสริม จันทร์ฉาย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร. จุฬารัตน์ เบญจปิยะพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ธนรัฐ ศรีวีระกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ย่ำไพศักดิ์ ทิบุญมา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. นริส ประทีนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. จีรวรรณ เตียรณีสวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. สมบูรณ์ เวชกามา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. วันชัย นิมนวี	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ผศ.ดร. ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผศ.ดร. ศิริ ดวงพร	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผศ.ดร. สมชาย มณีวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. เจริญพร เลิศสถิตชนกร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. บพิช บุปผโชติ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. ณ์จุพล ภูมิสะอาด	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ(ต่อ)

ผศ.ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณี	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อภินันท์ อูโรโสภณ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. กันย์ วงศ์เกษม	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร. ดาเรศน์ กิตติโยภาส	กรมส่งเสริมการเกษตร
	และสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
อ.ดร. ชลิตา เนียมมัญญ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร. ชัยยันต์ จันทร์ศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.ดร. ณรงค์ อังกิมบัวน	มหาวิทยาลัยบูรพา
อ.ดร. เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. จักรมาส เลหาวนิช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณทา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นเรศ มีโส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นุชิตา สุวแพทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. พลกฤษณ์ จิตต์โต	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ละมุล วิเศษ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุนันทา เลาว์ณย์ศิริ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุพรรณ ยั่งยืน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. อรุมา ลาสุนนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ปวีชา ศรีประภาคาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ศิริลักษณ์ วงศ์เกษม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. วาญญู รอดประพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. ระวี พรหมหลวงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี



สารบัญ (ต่อ)

รหัสบทความ	ชื่อบทความ
RE15	การศึกษาไปกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล <i>พินิจ สังข์ทอง และ วิรัชย์ ไธนรินทร์</i>
RE16	ฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลขนาดกำลังการผลิต 150 เมกกะวัตต์บริเวณอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช <i>สมพล ชีวมงคลกานต์, จอมภพ แวศักดิ์ และ ธเนศ ไชยชนะ</i>
RE17	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบเพื่อการติดตั้งตัวนำล่อฟ้าในระบบ ไฟโตโวลตาอิก <i>ทรงพล อธิรัตน์, สมชัย ทิริญวโรดม และบุญยัง ปลั่งกลาง</i>
RE18	การประเมินทางด้านเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งอยู่ กับที่และแบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ในประเทศไทย <i>คงฤทธิย์ แม่นศิริ, นิพนธ์ เกตุจ้อย, รัฐพร เงินมีศรี, ณัฐวุฒิ ชาวสะอาด และ ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์</i>
RE19	การลดลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากความต้านทานภายใน <i>นิพนธ์ เกตุจ้อย, ณัฐวุฒิ ชาวสะอาด, ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์ และรัฐดิพร เจาจะจง</i>
RE20	การศึกษาผลกระทบของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการผลิตไฟฟ้า <i>มรุพงศ์ กอนออยู่, ศรายุทธ ้วยวุฒิ และนิพนธ์ เกตุจ้อย</i>
RE21	การศึกษาความเป็นไปได้ของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาด 10 MW บริเวณพื้นที่ อ.กระแสดำเนิน จ.สงขลา <i>ชนะ จันทร์ฉวี, จอมภพ แวศักดิ์ และ ธเนศ ไชยชนะ</i>
RE22	A Robust Optimization Model for DC Optimal Power Flow Considering Wind Power Generation Uncertainty <i>Chanwit Boonchuay, Songklod Sriprang, Anuchit Aurairatch, and Weerakom Ongsakul</i>
RE23	การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ไอเสียมาผลิตน้ำร้อนสำหรับบกกกลูกสุกรในฟาร์มสุกร <i>ศรัญญู สมศิริตระกูล และ รัชพล สันติวารการ</i>
RE24	เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก <i>บัญชา ศรีวิโรจน์ และ วันชัย ทรัพย์สิงห์</i>
RE25	การประจุพลังงานแบตเตอรี่จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบบัคหลายสตรึงที่ควบคุม ด้วยการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด <i>ศุภลักษณ์ ศรีตา, อุเทน คำน่าน, สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์, ยุทธนา ขำสุวรรณ</i>
RE26	การใช้อากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงแก๊สในการอบแห้งเฟอร์นิเจอร์ไม้เคลือบ สีเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงแก๊ส <i>สาคร อินทะชัย, นเรศ มีโส และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ</i>



การประชุมวิชาการเครื่องจักรพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

การศึกษาใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล Studying of Blade Effect of 1.5 MW Wind Turbine Using CFD Technique

พินิจ สังข์ทอง¹, วิรัชย์ ไรยนรินทร์^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3497 โทรสาร 0-2549-3432 E-mail: wirachairoynarin@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ นำเสนอการวิเคราะห์ผลจากความยาวใบกังหันลมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยมีความยาวใบ 3.9, 4.1 และ 6.8 เมตร ตัวแปรที่ใช้คือ ความเร็วลมเฉลี่ย 5 เมตร/วินาที มุมองศาการบิดของใบ 3 องศา และมีรูปร่างเป็นชนิดเดียวกันทั้งสามขนาด โดยการใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) CFD ช่วยในการวิเคราะห์ คือโปรแกรม CF-Design V.8 ศึกษาสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงผลักของใบ ผลที่ได้นำมาคำนวณค่ากำลังงานของใบแต่ละขนาด โดยนำมาประยุกต์เข้ากับการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การยกตัวที่ดีที่สุดคือที่ความยาวใบ 6.8 เมตร มีค่า 1.907 สัมประสิทธิ์การผลักตัว 0.091 ทั้งนี้เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบมีขนาดเพิ่มขึ้น 5 เมตร กำลังงานที่ได้จากใบกังหันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 20% และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูล Power curve กับบริษัทผู้ผลิตแล้วพบว่ามีความแตกต่างกัน 9% ดังนั้นโปรแกรม CFD สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันลม

คำหลัก: สัมประสิทธิ์แรงยก, สัมประสิทธิ์แรงผลัก, โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

Abstract

This research presents the study of blade length of the wind machine which effect to the power. The blade length of 3.9, 4.1 and 6.8 m. which incoming wind speed of 5 m/s, pitch angle 3 degree on the same blade profile phenomena were used for the study. The investigation uses commercial Computation Fluid Dynamics (CFD) named CF Design V.8. The lift and drag coefficient (C_L , C_D) also studied and investigated. The results were used to compute the power of wind machine at varies parameters above. Additionally, the results also applied to scaling up wind machine of 1.5 MW for the comparison purpose. Results from the study shown that extending blade diameter of 5 m. increasing 20 % of power which high lift and drag coefficient of 1.90 and 0.091, respectively. The power shown the reasonable results compare to power curve shown by company which errors of 9 %. The CFD technique was shown the promising results for the performance investigation of the wind machine.

Keywords: Lift coefficient, Drag coefficient, CFD, Turbine Design



1. บทนำ

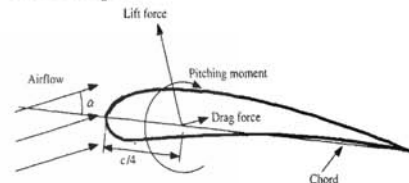
เนื่องจากความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ที่มีศักยภาพของประเทศไทย มีค่าเฉลี่ยประมาณ 5 m/s ดังนั้นการที่จะทำให้ประสิทธิภาพของกังหันลมผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ คือการขยายช่วงความยาวใบของกังหันลม ให้เหมาะสมกับพลังงานของลมที่เข้ามา การวิเคราะห์ข้อมูลของแรงยกตัวและแรงผลักรัดตัวจากความยาวใบ นั่นคือการหาประสิทธิภาพการยกตัวและประสิทธิภาพการผลักรัดตัวของใบกังหันลม ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และมีประโยชน์เป็นอย่างมากต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม ให้คำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล (Computation Fluid Dynamics) หรือ CFD ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ในด้านกลศาสตร์ของของไหล ที่ไหลผ่านรูปทรงที่มีความยุ่งยากซับซ้อนได้ ซึ่งการทดสอบในอุโมงค์ลมจริงๆ อาจต้องใช้ระยะเวลา และค่าใช้จ่ายที่สูงมาก CFD จึงกลายเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมและการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของของไหล งานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของของไหลมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้จากใบกังหันลมที่มีขนาดความยาวใบที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นประโยชน์และแนวทางในการพิจารณาเลือกขนาดใบให้เหมาะสม สำหรับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ในประเทศไทยต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดของแรงยก และแรงผลักรัด (Lift force and Drag force)

แรงกระทำต่อแพนอากาศ (Airfoil) และแรงดังกล่าวที่อยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลจะถูกเรียกว่า "แรงยก" (Lift force) แทนด้วยสัญลักษณ์ "L" แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศ ซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนที่ผิว และแรงจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหลจะถูก

เรียกว่า "แรงผลักรัด" (Drag force) แทนด้วยสัญลักษณ์ "D" ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเกิดแรงยกและ แรงผลักรัดบน Air foil ค่าแรงยกและแรงผลักรัด จะได้จากการทดสอบแพนอากาศดังกล่าวในอุโมงค์ลม ซึ่งมักจะแสดงค่าแรงยกและแรงหน่วงอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก C_L และสัมประสิทธิ์แรงผลักรัด C_D โดยที่นิยามของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะเขียนได้เป็น

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A U_{rel}^2} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A U_{rel}^2} \quad (2)$$

เมื่อ C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก
 C_D = สัมประสิทธิ์แรงผลักรัด
 L = แรงยก (Lift force, N)
 D = แรงผลักรัด (Drag force, N)
 ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
 A = พื้นที่ระนาบของแพนอากาศ (m^2)
 U_{rel} = ความเร็วลมสัมพัทธ์ (m/s)

2.2 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio, TSR)

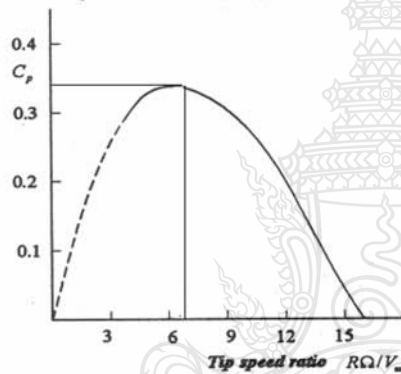
สมรรถนะของกังหันลมที่ต้องพิจารณา คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังงาน C_p กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio) จะแสดงตามรูปที่ 2 สำหรับเลือกอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ให้ได้ค่า C_p สูงสุด ซึ่งเป็นการหาว่าใบกังหันหมุนทำงานได้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ TSR เท่าใด อัตราส่วนความเร็วปลายใบเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็ว



ปลายใบกึ่งหันลมกับความเร็วม โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{v}{U_0} = \frac{r\Omega}{U_0} \quad (3)$$

- เมื่อ λ = อัตราส่วนความเร็วปลายใบ
- Ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
- r = รัศมีใบกึ่งหันลม (m)
- U_0 = ความเร็วม (m/s)

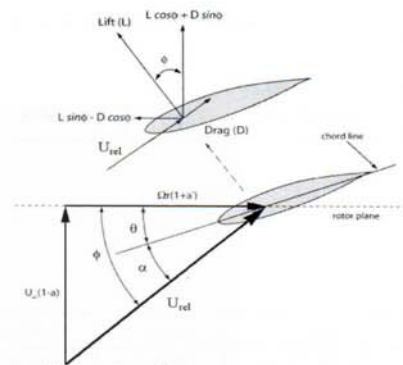


รูปที่ 2 ตัวอย่างสมรรถนะกึ่งหันลมแกนนอน [1]

2.3 ทฤษฎี Blade Element Theory

เป็นการพิจารณาแรงที่กระทำบนใบกึ่งหันในลักษณะสองมิติ แล้วคำนวณค่าคุณลักษณะต่างๆที่มีผลกับใบกึ่งหันลม เช่น แรงยก แรงผลัก ที่เป็นผลมาจากมุมปะทะ และความเร็วลม

เมื่อพิจารณาที่ใบกึ่งหันลมในแต่ละส่วน (Blade Element) ความเร็วที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้เป็นความเร็วในแนวแกน และความเร็วในแนวการหมุน



รูปที่ 3 แรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดรูป airfoil ของใบกึ่งหันลม [1]

พิจารณาแรงจากเวกเตอร์ตามรูปที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์

$$F_y = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (4)$$

$$F_z = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (5)$$

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{\lambda(1+a')} = \frac{U_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} \quad (6)$$

- เมื่อ a = แฟคเตอร์ความสูญเสียในแนวแกน
- a' = แฟคเตอร์ความสูญเสียในแนวรัศมี
- ϕ = มุมความเร็วลมสัมพันธ์

จากทฤษฎีของ Betz กึ่งหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ a มีค่าเท่ากับ 1/3 สำหรับ a' จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากไม่คิดการเกิดการคองของอากาศ (Wake Rotation) ดังนั้นเมื่อพิจารณากึ่งหันลมทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุด จะได้สมการเป็น [1]

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2U_0}{3r\Omega} \quad (7)$$



$$U_{rel} = \sqrt{\left(\frac{2U_0}{3}\right)^2 + (r\Omega)^2} \quad (8)$$

กำลังงานที่ได้จากใบกังหันลมสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_0^3 (\cot\phi)(1 + \cot^2\phi)(C_L \sin\phi - C_D \cos\phi) B \quad (9)$$

เมื่อ P = กำลังงานจากใบกังหันลม (Watts)

C_L = สัมประสิทธิ์แรงยก

C_D = สัมประสิทธิ์แรงผลัก

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่ระนาบของแพนอากาศ (m^2)

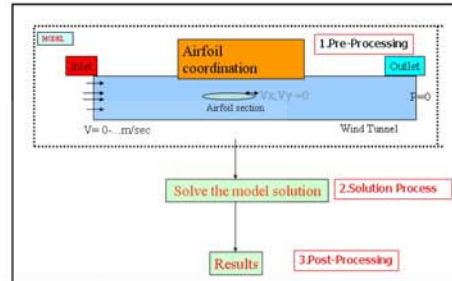
U_0 = ความเร็วลม (m/s)

ϕ = มุมความเร็วลมสัมพันธ์

B = จำนวนใบกังหันลม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนี้ จะใช้กระบวนการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล (Computation Fluid Dynamics) หรือ CFD มาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำการทดสอบกับใบของกังหันลม 3 ขนาด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใบที่แตกต่างกัน คือ 72, 77 และ 82 เมตร โดยทำการย่อยส่วนใบกังหันลมผลิตไฟฟ้ากำลังผลิตขนาด 1.5 MW ลงมาด้วยมาตราส่วน 1 ต่อ 9.15 จากขนาดรัศมีใบเดิมที่ 37.5 เมตร มาเป็นขนาดรัศมีใบ 4.1 เมตร ย่อยส่วนใบลงมาด้วยมาตราส่วน 5.88 จากขนาดรัศมีใบที่เพิ่มขึ้น จากขนาด 40 เมตร มาเป็นขนาดรัศมีใบ 6.8 เมตร และย่อยส่วนใบลงมาด้วยมาตราส่วน 8.97 จากขนาดรัศมีใบที่ลดลง จากขนาด 35 เมตร มาเป็นขนาดรัศมีใบ 3.9 เมตร และทำการหาค่ากำลังงานที่ได้จากใบกังหันลมแต่ละขนาด



รูปที่ 4 ขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรม [4]

3.1 การประมวลผลของโปรแกรม

ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรม ซึ่งมี 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 4 คือ

- Pre-processing เป็นขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลเพื่อการคำนวณ เช่น การกำหนดขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) แรงกระทำ (Load) การกำหนดค่าความดัน และอุณหภูมิ เป็นต้น

- Solution การคำนวณหาผลเฉลย หรือหาคำตอบจากการใช้สมการทางคณิตศาสตร์โดยแก้ปัญหาว่าเป็นโมเดลคณิตศาสตร์แบบใด

- Post-processing การแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณในรูปแบบชิ้นงานหรือกราฟหรือหาค่าแรงและโมเมนต์ต่างๆ

3.2 การสร้างรูปแบบการวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลจะแยกตามวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) ดังนี้

- Building the Mathematical Model (สร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์)

- Building the Computational Fluid Dynamics Model (สร้างรูปแบบชิ้นส่วนย่อย)

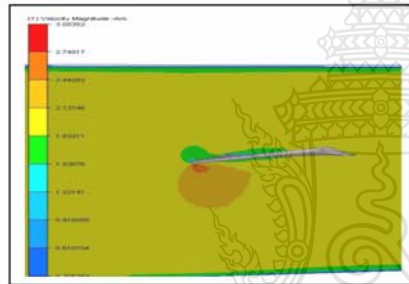
- Solving the Computational Fluid Dynamics Model (สร้างรูปแบบการแก้สมการ)

- Analysis the Results (การวิเคราะห์ผลเฉลย)



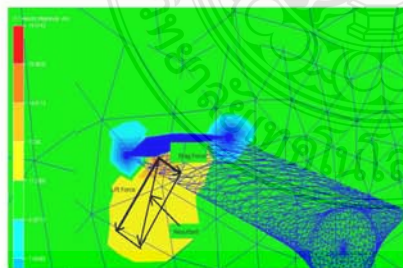
3.3 การกำหนดข้อมูลและตัวแปรต่าง ๆ

1. กำหนดความเร็วลมทางด้านขาเข้าเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที
2. กำหนดให้อูโมงค์ลมมีความยาว 30 เมตร
3. กำหนดความดันขาออกจากอูโมงค์ลมเท่ากับศูนย์ความดันเกจ
4. กำหนดผิวของใบกังหันมีความเร็วเริ่มต้นทุกทิศทาง X Y Z เท่ากับศูนย์
5. กำหนดให้อากาศเป็นชนิดของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid)



รูปที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ใบกังหันภายในอูโมงค์ลม

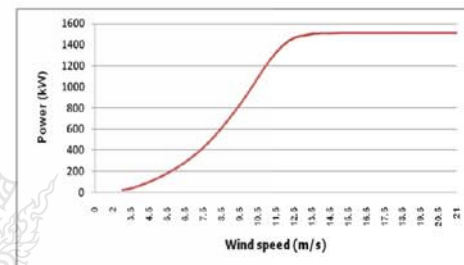
รูปที่ 5 เป็นการแสดงให้เห็นการวิเคราะห์ใบกังหันภายในอูโมงค์ลม ด้วยโปรแกรม CFD ตามค่าต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น สำหรับรูปที่ 6 จะเป็นตัวอย่างลักษณะของแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากแรงยก และแรงผลักที่เป็นผลมาจากมุมปะทะ และความเร็วลมที่เข้ามา



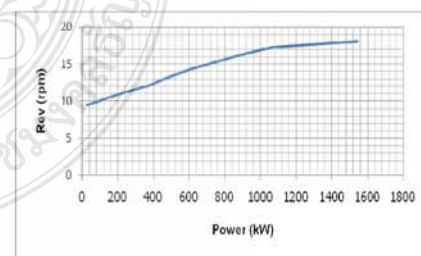
รูปที่ 6 ลักษณะแรงที่กระทำกับใบกังหันลม

3.4 การคำนวณหาค่าสิ่งที่ได้จากใบกังหันลม

การคำนวณหาค่าสิ่งที่เกิดขึ้นจากใบกังหันลมสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 9 ทั้งนี้ต้องทราบมุมความเร็วลมสัมพันธ์ เพื่อนำมาแทนค่าในสมการ ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟนำ Power Curve ของกังหันลมขนาด 1.5MW มาวิเคราะห์ร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต (ได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต)



รูปที่ 7 Power curve กังหันลมขนาด 1.5 MW สำหรับความเร็วลมที่พิจารณาคือ 5 m/s เมื่อดูจาก Power curve ของกังหันลม ตามรูปที่ 7 จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบมาตรฐานที่ 77 เมตร หรือ ขนาดรัศมีใบ 37.5 เมตร จะได้กำลังผลิต 140 kW และจากกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต ตามรูปที่ 8 โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 10 rpm



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์กับกำลังผลิต

เมื่อแทนค่ารอบการหมุนของโรเตอร์ ที่ความเร็วลม 5 m/s สามารถคำนวณหามุมความเร็วลมสัมพันธ์ของใบกังหันได้ตามสมการที่ 7 โดยค่า C_L และ C_D ได้จาก



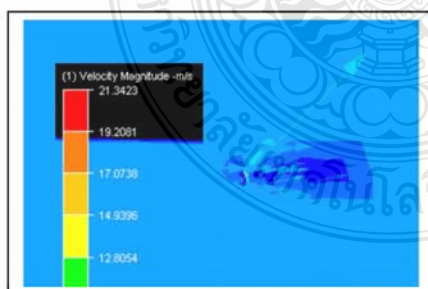
การคำนวณตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งค่าแรงยก (L) และแรงผลึก (D) จะได้จากผลของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD ตามขนาดของใบกังหันลมแต่ละขนาด

4. ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับใบกังหันลมแต่ละขนาดด้วยโปรแกรม CFD จะได้ผลของการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1 แรงที่เกิดขึ้นกับใบกังหันลมแต่ละขนาดก็จะแตกต่างกันไป โดย F_y จะเป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y และ F_z เป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z ณ จุด Centroid ของใบกังหันลมแต่ละขนาด สำหรับแกน Z จะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของลมที่ปะทะกับใบกังหันลม ส่วนแกน Y จะมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมในแนวแกนตั้ง รูปที่ 9 จะแสดงลักษณะทิศทางเวกเตอร์ของแรงที่กระทำกับใบกังหันลม จากรูปจะเห็นลูกศรแสดงทิศทางของแรงยกตัวของใบกังหัน ในขณะที่โปรแกรมกำลังทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก CFD

ขนาดใบ	3.9 m	4.1 m	6.8 m
F_y (N)	0.83	1.14	4.23
F_z (N)	22.16	28.58	88.06
Centroid (m)	1.55	1.64	2.67



รูปที่ 9 เวกเตอร์ของแรงที่กระทำกับใบกังหันลม ค่าของแรงยกตัว (L) และแรงผลึก (D) ของใบกังหันลมแต่ละขนาด ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะได้อีกมาจากผลของแรงตามขนาดของ F_y และ F_z จาก

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4 และ 5 โดยขนาดรัศมีใบกังหันลมที่ 3.9, 4.1 และ 6.8 เมตร จะได้กำลังงานจากใบกังหันลม ตามสมการที่ 9 คือ 12.97, 16.64 และ 31.24 kW ตามลำดับ เมื่อขยายขนาดรัศมีใบกังหันลมจากขนาด 4.1 เมตร โดยการคูณด้วย Scaling ให้เป็นขนาด 37.5 เมตร ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานของใบกังหันลม จะได้กำลังงาน 152.26 kW จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกับกำลังผลิตจาก Power Curve ของกังหันลมที่ 140 kW ซึ่งมีค่าแตกต่างกันประมาณ 9% ในลักษณะเดียวกัน เมื่อขยายขนาดรัศมีใบกังหันลม จากขนาด 6.8 เมตร ให้เป็นขนาด 40 เมตร โดยการคูณด้วย Scaling จะได้กำลังงานจากใบกังหันลม 183.69 kW ซึ่งจะได้กำลังงานเพิ่มขึ้น 20.64% และเมื่อลดขนาดรัศมีใบให้มีขนาด 3.9 เมตร และคูณด้วย Scaling ให้เป็นขนาด 35 เมตร จะได้กำลังงานจากใบกังหันลม 116.34 kW ซึ่งกำลังงานที่ได้จะลดลง 23.59%

ตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์

ขนาดใบ	3.9 (35m)	4.1 (37.5m)	6.8 (40m)
L (N)	22.18	28.60	88.16
D (N)	0.83	1.14	4.23
C_L	1.820	1.866	1.907
C_D	0.068	0.074	0.091
P(kW)	12.97	16.64	31.24
Scaling	8.97	9.15	5.88
P(kW)	116.34	152.26	183.69
%	-23.59%	-	+20.64%

5. สรุปผล

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD พบว่าขนาดของใบกังหันลมที่เปลี่ยนแปลงไป มีผลต่อกำลังงานที่ได้จากกังหันลม แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วลม 5 m/s เมื่อเพิ่มขนาดใบกังหันลม ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบเพิ่มขึ้น 5 เมตร จากขนาด 77 เมตร เป็น ขนาด 82 เมตร กำลังงานทางกลที่ได้จากใบกังหันลม จะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 20% หรือ หากลด



ขนาดใบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง 5 เมตร กำลังงานที่ได้จากใบกังหันลมก็จะลดลงประมาณ 20% เช่นกัน ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความเร็วลมเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบ จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าให้กับกังหันลม ดังนั้นในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ จึงควรคำนึงถึงขนาดความยาวใบกังหันลม เพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ที่มีศักยภาพของประเทศไทย ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ที่ 5-6 m/s

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบพระคุณ บุคลากร เจ้าหน้าที่ อากาศวิจัยประยุกต์ พลังงานลม น้ำ และแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในการดำเนินการวิจัย และจัดทำเอกสารเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.F. Manwell, J.G. Mcgowan and A.L. Rogers (2009). Wind Energy Explained, John Wiley & Sons, West Sussex.
- [2] S.N. Bhadra, D. Kस्था and S.Banerjee (2011) Wind Electrical Systems, Oxford University Press, New Delhi.
- [3] Francis M. Vanek, Louis D. Albright (2008). Energy Systems Engineering Evaluation and Implementation, Mc Graw Hill.
- [4] สว่างชาติทอง, วิรัชย์ โรยนรินทร์ (2553). การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรอบการทำงานสูงสุดของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6, จังหวัดเพชรบุรี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพินิจ สังข์ทอง
วันเดือนปีเกิด	26 มกราคม 2518
ที่อยู่	99/215 ตำบลลำลูกกา อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีปทุม ปี พ.ศ. 2540
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2542 - พ.ศ. 2543	บริษัท วิภาวดี คอนซัลแตนท์ จำกัด ตำแหน่งวิศวกร
พ.ศ. 2544 - พ.ศ. 2545	บริษัท พร่อม เทคโนโลยีเซอร์วิส จำกัด ตำแหน่งช่างเทคนิคอาวุโส
พ.ศ. 2546 - พ.ศ. 2548	บริษัท โกลเกียร์ เอ็นจิเนียริ่ง ซิสเต็ม จำกัด ตำแหน่งวิศวกร
พ.ศ. 2549 - พ.ศ. 2550	กรมวิทยาศาสตร์บริการ ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 3
พ.ศ. 2550 - ปัจจุบัน	กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ตำแหน่งวิศวกร เครื่องกลปฏิบัติการ

