

การศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพ
การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณ
ทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์

THE STUDY OF AIR FLOW OBSTRUCTION EFFECT
ON SMALL WIND TURBINE PERFORMANCE USING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

ศิริพร สุขกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพ
การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณ
ทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์

ศิริพร สุขกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์

The Study of Air Flow Obstruction Effect on Small Wind Turbine Performance Using Computational Fluid Dynamics

ชื่อ - นามสกุล

เรืออากาศโทหญิงศิริพร สุขกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรชัย โรยนรินทร์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(อาจารย์วินัย จันทร์เพ็ง, ปร.ด.)



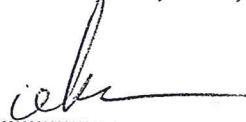
กรรมการ

(อาจารย์อำพล อภาธนากร, ปร.ด.)



กรรมการ

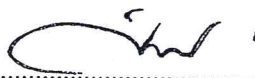
(อาจารย์สถาพร ทองวิก, ปร.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรชัย โรยนรินทร์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์
ชื่อ-นามสกุล	เรืออากาศโทหญิงศิริพร สุขกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัช ไรยนรินทร์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ณ ศูนย์ฝึกศึกษาบุคลากรปิโตรเลียมพลังงานทหาร จ.ระยอง ดำเนินงานวิจัยโดยทำการเก็บข้อมูลการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์และจำลองโมเดล 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWork

วิเคราะห์ข้อมูลการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFDesign) ที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ ผ่านกลุ่มอาคารต่างๆ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่ตำแหน่งการติดตั้งกังหันลมตัวที่ 12,18 และ 24 เมตร

จากผลการวิเคราะห์การขวางการไหลของอากาศ พบว่าความเร็วลมลดลงเห็นได้ชัดเจนในตำแหน่งกังหันลมตัวที่ 1 ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือลดลง 25.26 เปอร์เซ็นต์ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ลดลง 69.79 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ารวมมีค่าเท่ากับ 43,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ลดลง 67.6% เมื่อเทียบกับไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลของอากาศ และได้ทดลองเพิ่มระยะห่างการติดตั้งกังหันลมเท่ากับ 12,18 และ 24 เมตร พบว่าความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุดคือที่ระยะ 24 เมตร

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหล กังหันลมผลิตไฟฟ้า การขวางการไหล

Thesis Title	The Study of Air Flow Obstruction Effect on Small Wind Turbine Performance Using Computational Fluid Dynamics
Name-Surname	Flg. Off. Siriporn Sukkul
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Wirachai Roynarin, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

This study aimed to investigate the air flow obstruction effect on 5 kW wind turbine performance. The study used three units of 5 kW horizontal wind turbine located at Petroleum and Energy Training Centre at Rayong province for the investigation. The 3 dimension model of the machines was created by SolideWork commercial program.

In this study, the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique was applied to the boundary condition of maximum air flow to the model of 10 m/s. Two directions of the flow were studied, North-East (NE) and South-West (SW) of the wind turbine performance across the building. The distance from the building to the wind turbines was at 12, 18 and 24 meter, applied to CFD model for the analysis.

The results of studied showed that the performance of the wind turbine located on the NE direction was reduced up to 25.26%. Additionally, at the same condition and parameters, the performance of which located on the SW direction was dropped up to 69.79%. The total energy production of the wind turbines was 43,000 units per years for the calculation. However, from CFD results from the obstruction, the machine could produce only 13,929 units per year which was 67.6 % lower than the performance from the calculation. Additionally, the results showed that at 24 meter distance from the building to the wind turbine was the minimum of turbulent affected to the power performance.

Keywords: CFD, wind turbine, air flow obstruction

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช ไรยนรินทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแนะนำ แนวทางการทำวิจัย การแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ทำให้ผู้วิจัยทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี ซึ่งผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.วินัย จันทรเพ็ญ, ดร.สถาพร ทองวิค และผู้ทรงคุณวุฒิ ดร.อำพล อาภาชนากร จากสำนักงานวัฒนธรรมแห่งชาติ(องค์กรมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำและปรึกษาตลอดจนให้ ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัยและเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับ นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และเสนอแนะแนวทาง ต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จึงขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา กำลังใจจากครอบครัว และเพื่อนๆทุกคน ที่ คอยสนับสนุน ให้กำลังใจและให้การช่วยเหลือด้วยดีเสมอมาตลอดการศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยรู้สึก ซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ศิริพร สุขกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	14
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
1.6 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการศึกษางานวิจัย.....	16
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การเกิดลม.....	17
2.2 การแปรค่าความเร็วลมตามความสูง.....	20
2.3 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามเวลา.....	21
2.4 ความปั่นป่วนของลม.....	22
2.5 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม.....	23
2.6 กำลังงานจากลม.....	23
2.7 กำลังงานจากกังหันลม.....	25
2.8 ประสิทธิภาพกังหันลม (Power Coefficient)	25
2.9 ประเภทของกังหันลม.....	27
2.10 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของ ไหล.....	29
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.2 กล่าวนำ.....	43
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	44
3.4 การวิเคราะห์การไหลของอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFD.....	44
3.5 วิเคราะห์การไหลของอากาศบริเวณหน้าโรเตอร์ของกังหันลม ที่ระยะ 12,18 และ 24 เมตร.....	46
3.6 ข้อมูลกำลังงานไฟฟ้าของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์.....	53
3.7 สถานที่ติดตั้งกังหันลมในงานวิจัย.....	55
3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์เปรียบเทียบการไหลของอากาศเมื่อมีสิ่งกีดขวางการไหล กับไม่มีสิ่งกีดขวางการไหล.....	56
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย	
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลลม.....	57
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมที่ควรผลิตได้รายวันและ รายปี.....	59
4.3 ผลของการประมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ผลิตได้	60
4.4 ผลความสูงของอาคารที่มีผลต่อกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จากการ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD.....	63
4.5 วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเมื่อเปลี่ยนระยะการติดตั้งกังหันลมที่ ระยะ 12,18 และ 24 เมตร.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัย	
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71

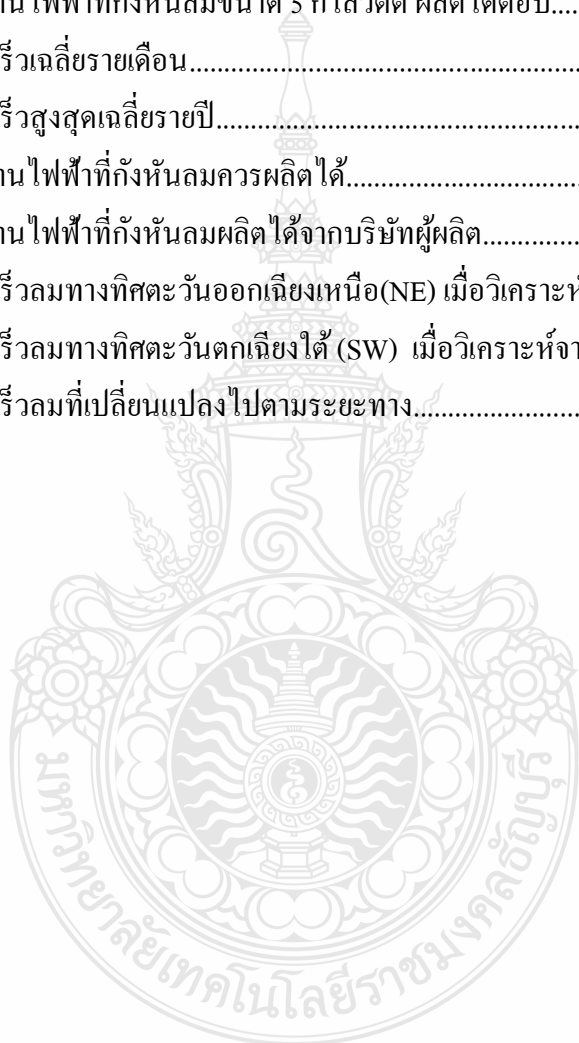
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์.....	75
ภาคผนวก ข. ข้อมูลความเร็วลมจากกรมอุตุนิยมวิทยา.....	85
ภาคผนวก ค. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	116



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย..... 42
ตารางที่ 3.2	ขนาดของอาคารและตำแหน่งการติดตั้งกังหันลม..... 44
ตารางที่ 3.3	พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ผลิตได้ต่อปี..... 53
ตารางที่ 4.1	ความเร็วเฉลี่ยรายเดือน..... 57
ตารางที่ 4.2	ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยรายปี..... 58
ตารางที่ 4.3	พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้..... 59
ตารางที่ 4.4	พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จากบริษัทผู้ผลิต..... 60
ตารางที่ 4.5	ความเร็วลมทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ(NE) เมื่อวิเคราะห์จากโปรแกรม CFD 63
ตารางที่ 4.6	ความเร็วลมทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เมื่อวิเคราะห์จากโปรแกรม CFD.... 67
ตารางที่ 4.7	ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง..... 69



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การติดตั้งกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ณ ศูนย์ศึกษาบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร.....	13
รูปที่ 1.2 พื้นที่บริเวณศูนย์ศึกษาบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง.....	14
รูปที่ 1.3 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	16
รูปที่ 2.1 ลมบกกลมทะเล [2].....	18
รูปที่ 2.2 ลมภูเขาและลมหุบเขา [3].....	18
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนทิศทางของลมตามฤดูกาล [1].....	19
รูปที่ 2.4 การแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงจากพื้นผิวโลก [1].....	20
รูปที่ 2.5 การแปรค่าของความเร็วลมตามเวลา [1].....	21
รูปที่ 2.6 การเกิดความปั่นป่วนของลมเมื่อเกิดสิ่งกีดขวาง [1].....	22
รูปที่ 2.7 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม เมื่อพัดขึ้นเนินเขา [1].....	23
รูปที่ 2.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ [1].....	24
รูปที่ 2.9 ประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่าง ๆ [4].....	26
รูปที่ 2.10 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนและแบบแกนตั้ง [5].....	28
รูปที่ 2.11 องค์ประกอบกังหันลมแบบความเร็วคงที่ (a) กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (b) และกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (c) [5].....	28
รูปที่ 2.12 ค่าความละเอียดของ Mesh ในโปรแกรม CFD [5].....	31
รูปที่ 2.13 หลักการทำงาน โดยทั่วไปของโปรแกรม CFD [5].....	32
รูปที่ 2.14 ปริมาตรควบคุม [5].....	34
รูปที่ 2.15 ค่าความเร็ว μ ในการปั่นป่วน [5].....	35
รูปที่ 2.16 ผลวิเคราะห์ใบกังหันลมที่ความเร็วลม 7 m/s จากโปรแกรม CFD [5].....	39
รูปที่ 2.17 Velocity Streamline ของการจัดวางกรณี 7 และวิเคราะห์จากโปรแกรม CFD [7].....	40
รูปที่ 2.18 ทิศทางต่างๆที่ใช้วิเคราะห์การสูญเสียพลังงานด้วยโปรแกรม CFD [8].....	40
รูปที่ 2.19 การออกแบบรูปแบบฟาร์มกังหันลมที่ตำแหน่งต่างๆ [9].....	41

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ติดตั้ง ณ ศูนย์ฝึกอบรมการปีโตรเลียมพลังงานทางทหาร.....	43
รูปที่ 3.2 จำลองภาพ 3 มิติและทิศทางลมที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัย.....	45
รูปที่ 3.3 กำหนดทางเข้าลมทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW).....	45
รูปที่ 3.4 กำหนดทางเข้าทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE).....	46
รูปที่ 3.5 ความเร็วลมกับความเร็วปลายใบ [11].....	47
รูปที่ 3.6 ภาคตัดขวางของปริมาตรควบคุมรูปทรงกระบอก [12].....	47
รูปที่ 3.7 แผนภาพความเร็วลม (ก) โปรไฟล์ (profile) ความเร็วลม (ข) ความเร็วลมในสตรีมทูป [13].....	48
รูปที่ 3.8 วิเคราะห์การไหลของลมที่ระยะ 2d (12 เมตร).....	49
รูปที่ 3.9 วิเคราะห์การไหลของลมที่ระยะ 3d (18 เมตร).....	49
รูปที่ 3.10 วิเคราะห์การไหลของลมที่ระยะ 4d (24 เมตร).....	50
รูปที่ 3.11 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะห่างระหว่างเสากังหันลมเท่ากับ 12 เมตร.....	50
รูปที่ 3.12 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะห่างระหว่างเสากังหันลม เท่ากับ 18 เมตร.....	51
รูปที่ 3.13 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะห่างระหว่างเสากังหันลมเท่ากับ 24 เมตร.....	51
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างความเร็วลมที่ตำแหน่ง WT1 ที่ระยะ 18 เมตร.....	52
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างความเร็วลมที่ตำแหน่ง WT2 ที่ระยะ 18 เมตร.....	52
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างความเร็วลมที่ตำแหน่ง WT3 ที่ระยะ 18 เมตร.....	53
รูปที่ 3.17 Power Curve ของกังหันลม [14].....	54
รูปที่ 3.18 สถานที่ติดตั้งกังหันลม.....	55
รูปที่ 3.19 แผนที่ตั้งโครงการ.....	56
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของความเร็วลมเฉลี่ยรายวันในช่วงเดือนตุลาคม 2558 ถึงตุลาคม 2559.....	58

สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงกับความเร็วลมที่ตำแหน่งกังหันลม ตัวที่ 1 วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD.....	64
รูปที่ 4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงกับความเร็วลมที่ตำแหน่งกังหันลม ตัวที่ 2 วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD.....	64
รูปที่ 4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงกับความเร็วลมที่ตำแหน่งกังหันลม ตัวที่ 3 วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD.....	65
รูปที่ 4.5	วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะความสูงเท่ากับ 9.5 เมตร ด้วยโปรแกรม CFD.....	65
รูปที่ 4.6	วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะความสูงเท่ากับ 13.3 เมตร.....	66
รูปที่ 4.7	วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะความสูงเท่ากับ 15 เมตร.....	66
รูปที่ 4.8	วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะความสูงเท่ากับ 18 เมตร.....	67
รูปที่ 4.9	ที่ความสูง 9.25 เมตร เท่ากับความสูงอาคาร A,C ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้.....	68
รูปที่ 4.10	ที่ความสูง 18 เมตร เท่ากับความสูง Wind Turbine ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้.....	68
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังลมที่วัดได้จริงกับกำลังลมที่วิเคราะห์จาก โปรแกรม CFD ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE).....	69
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังลมที่วัดได้จริงกับกำลังลมที่วิเคราะห์จาก โปรแกรม CFD ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW).....	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

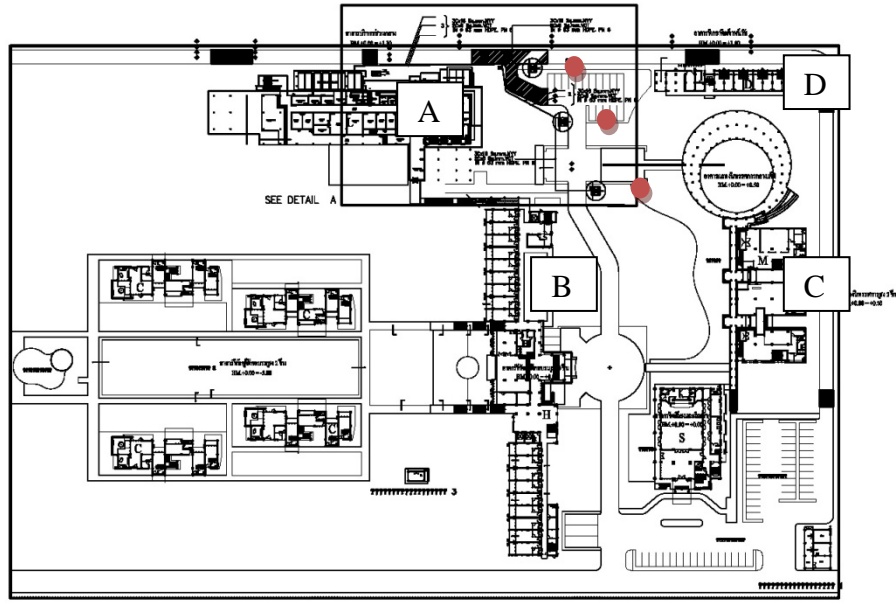
ผลกระทบการขวางการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลม นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย เช่น สภาพภูมิอากาศ ภูมิทัศน์บริเวณที่ติดตั้งกังหันลม ขนาดของกลุ่มอาคาร ฯลฯ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อการขวางการไหลของอากาศ กลศาสตร์ของไหลจึงมีส่วนสำคัญในการนำมาศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD V.7) เป็นโปรแกรมที่ใช้จำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์สามารถปรับค่าความละเอียดต่างๆ ได้ใกล้เคียงและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในทางวิศวกรรม วิเคราะห์ผลการไหลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่าน บริเวณหน้าตัดโรเตอร์ของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ที่ติดตั้งอยู่ ณ ศูนย์ฝึกอบรมทางด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง เพื่อดูผลกระทบการไหลของอากาศในครั้งนี้

ด้วยเหตุผลดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการจำลองการติดตั้งกังหันลมที่ระยะต่างๆ และศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางการไหลและวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่เกิดขึ้น เพื่อใช้สำหรับประกอบการตัดสินใจในการหาตำแหน่งติดตั้งกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดและเหมาะสมกับภูมิประเทศ



รูปที่ 1.1 การติดตั้งกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ณ ศูนย์ฝึกอบรมทางด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร



รูปที่ 1.2 พื้นที่บริเวณศูนย์ฝึกบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาการไหลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านกลุ่มอาคารและหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลมภายในศูนย์ฝึกบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร ด้วยแบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล (CFD V.7)

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 เมตร ติดตั้งอยู่ ณ ศูนย์ฝึกบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง

1.3.2 ใช้โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD V.7) มาวิเคราะห์หาความเร็วลมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านอาคาร

1.3.3 ใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD V.7) มาวิเคราะห์หาความเร็วลมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านหน้าโรเตอร์กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ที่ระยะห่างกังหันลมเท่ากับ 12, 18 และ 24 เมตร

1.3.4 กำหนดความเร็วลม 10 m/s และวิเคราะห์ความเร็วลมทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและทฤษฎีเกี่ยวกับภาระไหลของอากาศและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลม และจำลองภาพสามมิติของกลุ่มอาคารและสภาพแวดล้อมโดยรอบกังหันลมด้วยโปรแกรม SolidWork เพื่อเป็นต้นแบบในการทดลองการไหลของอากาศ

1.4.2 สร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรม CFD V.7

1.4.3 วิเคราะห์ผลจากโปรแกรม CFD V.7

1.4.5 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

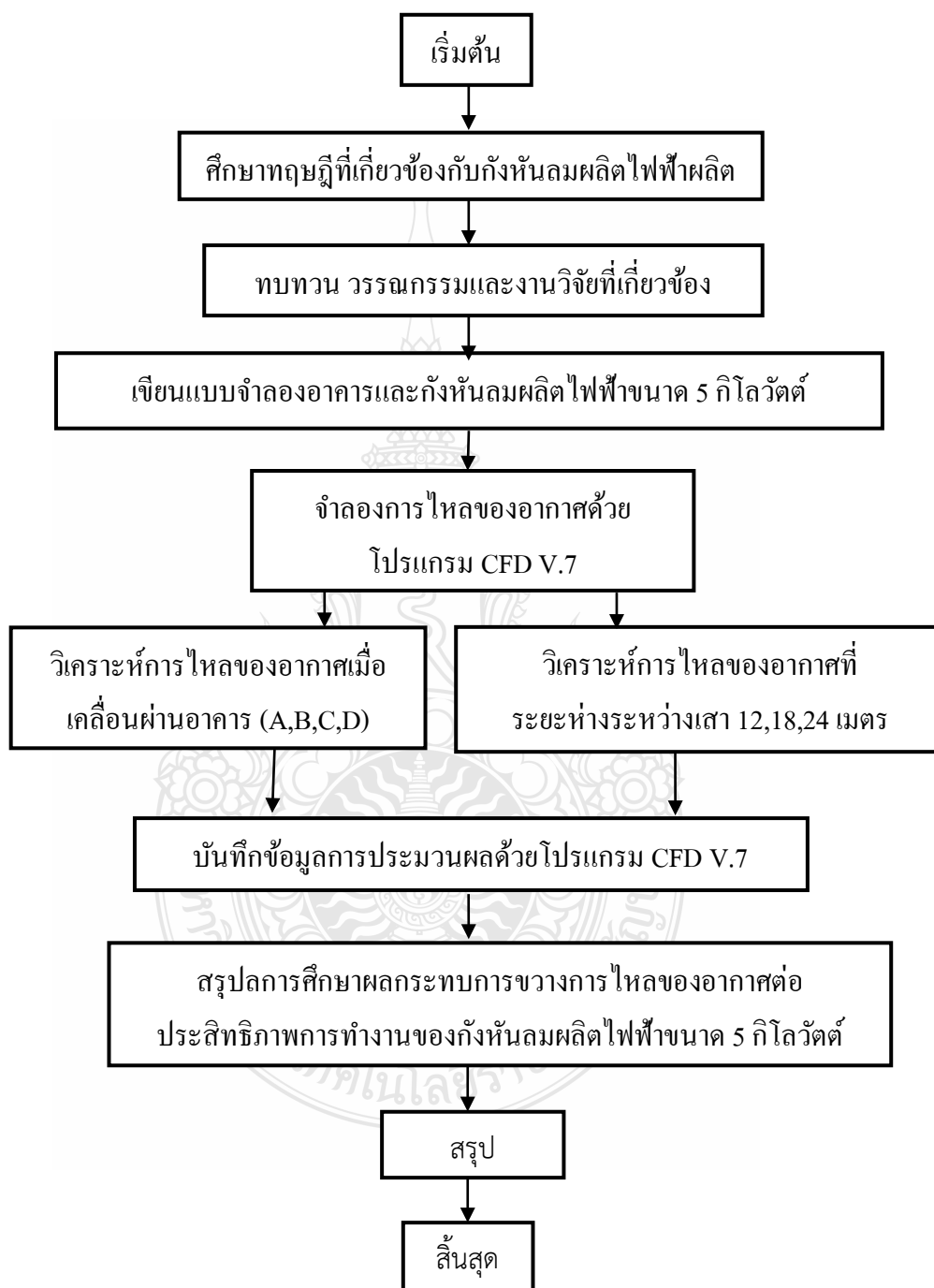
1.4.6 สรุปและจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.4.7 ตีพิมพ์เผยแพร่ผลการวิจัยในวารสารทางวิชาการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางในการพิจารณาการติดตั้งกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ให้เหมาะสมกับภูมิประเทศ

1.6 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการศึกษางานวิจัย



รูปที่ 1.3 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

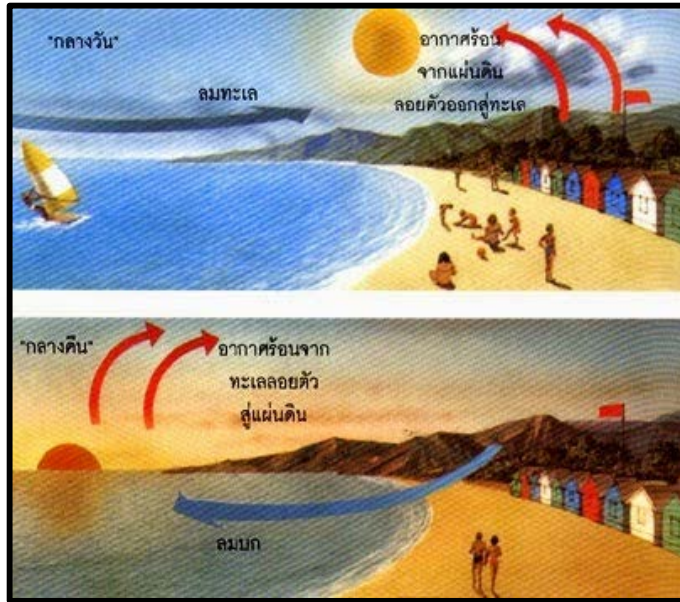
2.1 การเกิดลม

ลม (Wind) [1] สาเหตุหลักเกิดจากดวงอาทิตย์ เมื่อดวงอาทิตย์แผ่รังสีความร้อนมายังโลก ปริมาณ 174,423,000 GWh ในปริมาณพลังงานที่ได้รับจากดวงอาทิตย์มีเพียงร้อยละ 1-2 ของปริมาณเหล่านี้ที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานลม ในแต่ละตำแหน่งบนพื้นโลกได้รับพลังงานความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความกดอากาศในแต่ละตำแหน่ง บริเวณใดที่อุณหภูมิสูงหรือความกดอากาศต่ำอากาศในบริเวณนั้นก็จะลอยตัวสูงขึ้น อากาศที่เย็นกว่าหรือความกดอากาศสูงกว่าก็จะเคลื่อนที่เข้ามาแทน การเคลื่อนที่ของมวลอากาศนี้ทำให้เกิดลม และจากการเคลื่อนที่ของอากาศนี้จะทำให้เกิด พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้ ลมสามารถจำแนกได้หลายชนิดตามสถานที่ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิดังนี้

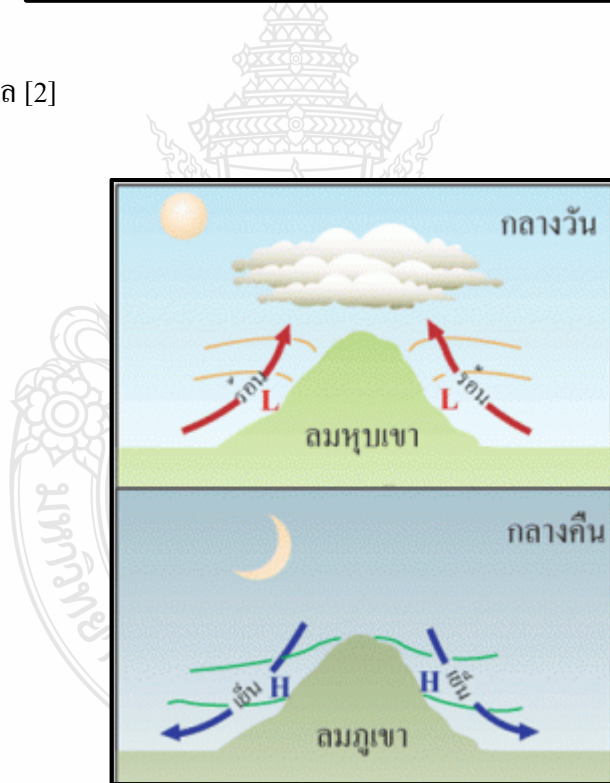
2.1.1 ลมประจำถิ่น[1]

2.1.1.1 ลมบกลมทะเล เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณทะเลกับชายฝั่ง โดยลมทะเลเกิดในตอนกลางวันเพราะบริเวณชายฝั่งมีอุณหภูมิสูงกว่าในทะเลจึงทำให้เกิดลมพัดจากทะเลเข้าสู่ฝั่ง ส่วนลมบกเกิดในเวลากลางคืนเพราะอุณหภูมิในทะเลสูงกว่าบนฝั่งและจะทำให้เกิดลมจากฝั่งออกสู่ทะเล

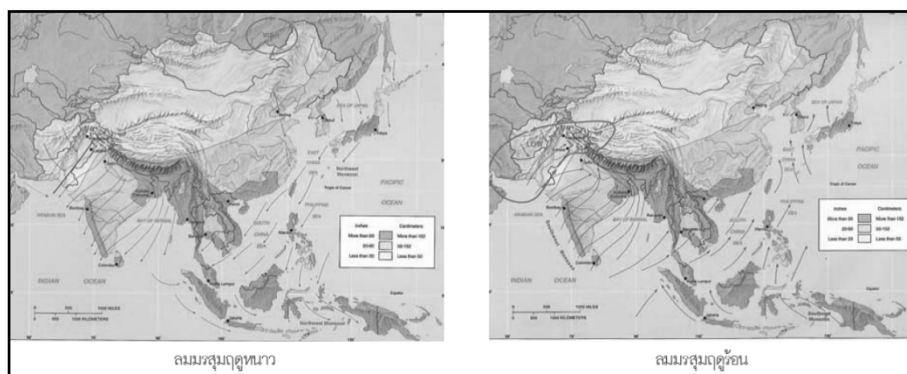
2.1.1.2 ลมภูเขาและลมหุบเขา เกิดจากความแตกต่างระหว่างบริเวณหุบเขาและสันเขา โดยลมภูเขาจะพัดจากสันเขาไปยังหุบเขาในตอนกลางคืน เนื่องจากบริเวณสันเขาเย็นกว่าหุบเขา ลมจึงพัดจากสันเขาไปยังหุบเขา ส่วนลมหุบเขาจะพัดจากหุบเขาขึ้นไปสันเขาในตอนกลางวัน เนื่องจากบริเวณด้านล่างหุบเขาจะมีอุณหภูมิต่ำกว่ายอดเขาลมจึงพัดขึ้นไปตามความสูงของสันเขา นอกจากนี้ยังมีการเรียกชื่อ ไปตามทิศการเคลื่อนที่ของฤดูกาล เช่น ลมมรสุม หมายถึงลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางตามฤดูกาล ฤดูร้อนจะพัดอยู่ในทิศทางหนึ่งจะเปลี่ยนทิศทางเป็นตรงกันข้ามเมื่อถึงฤดูหนาว



รูปที่ 2.1 ลมบกลมทะเล [2]



รูปที่ 2.2 ลมภูเขาและลมหุบเขา [3]



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนทิศทางของลมตามฤดูกาล [1]

2.1.1.3 ลมตะเภา เป็นลมท้องถิ่นประจำประเทศไทยที่พัฒนามาจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือ คือพัดจากอ่าวไทยเข้าสู่ภาคกลางตอนล่าง พัดในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนทิศจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือไปเป็นตะวันตกเฉียงใต้ การพัดของลมตะเภาจะนำความชื้นมาสู่ภาคกลางตอนล่าง ในสมัยโบราณ ลมนี้จะช่วยพัดเรือสำเภาที่เข้ามาค้าขายให้แล่นไปตามแม่น้ำเจ้าพระยา

2.1.1.4 ลมว่าว เป็นลมที่พัดจากทิศเหนือไปยังทิศใต้ เกิดขึ้นในช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนพฤศจิกายน ลมว่าวเป็นลมเย็นที่พัดมาจากแม่น้ำเจ้าพระยา และพัดในช่วงที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะเปลี่ยนเป็นลมตะวันออกเฉียงเหนือ หรืออาจจะเรียกลมข้าวเบา เพราะพัดในช่วงที่ข้าวเบากำลังออกรวง

2.1.2 ลมมรสุม

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

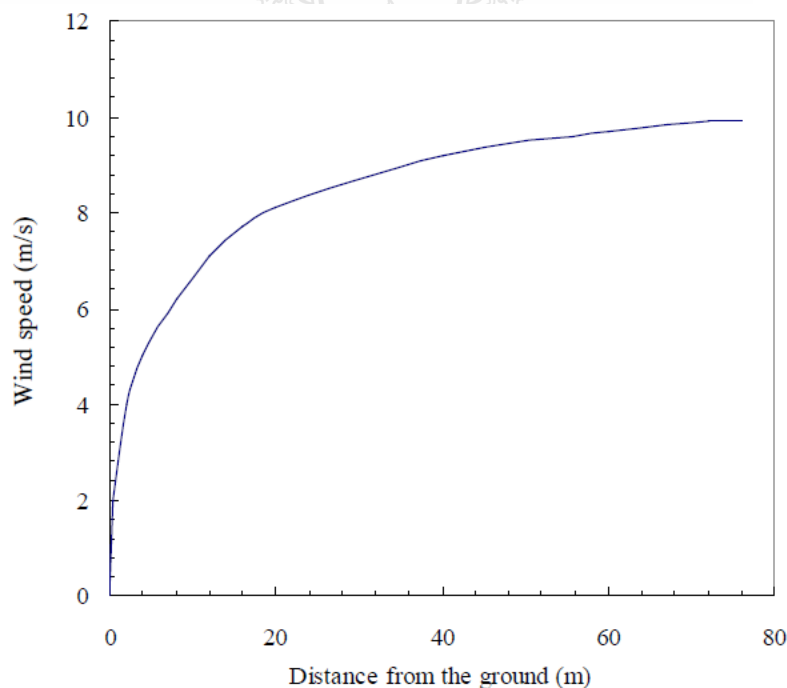
2.1.2.1 ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ หรือลมมรสุมฤดูร้อน พัดปกคลุมประเทศไทยในช่วงย่างเข้าฤดูฝน คือประมาณช่วงกลางเดือนพฤษภาคมไปจนถึงกลางเดือนตุลาคม ซึ่งเกิดจากความกดอากาศสูงในซีกโลกใต้ บริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งพัดออกจากศูนย์กลางเป็นลมตะวันออกเฉียง

เฉียงใต้และเปลี่ยนเป็น ลมตะวันตกเฉียงใต้เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตร ลมมรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนตกชุกทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเล และเทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่น

2.1.2.2 ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ หรือลมมรสุมฤดูหนาวที่พัดต่อจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะพัดผ่านประเทศไทยในช่วงฤดูหนาว คือ ในช่วงกลางเดือนตุลาคม ไปจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ และในบางปีอาจจะมีการไปถึงช่วงกลางเดือนมีนาคม ลมประเภทนี้เกิดจากความกดอากาศสูงบนซีกโลกเหนือแถบประเทศมองโกเลียและจีน [1]

2.2 การแปรค่าความเร็วลมตามความสูง

เนื่องจากกระแสลมที่พัดเหนือพื้นผิวโลกจะถูกหน่วงให้ช้าลง โดยความเสียดทานของพื้นผิว และสิ่งที่ปกคลุมพื้นผิวโลก เช่น ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ทำให้ความเร็วลมแปรค่าตามความสูงจากพื้นผิวโลก ซึ่งมีลักษณะทั่วไปตามกราฟรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงจากพื้นผิวโลก [1]

การแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงจะขึ้นกับความหยาบ (Roughness) ของพื้นผิวโลก และความสูง ในกรณีของพื้นผิวที่ราบ และไม่คิดผลจากอิทธิภูมิของพื้นผิว เราสามารถเขียนสมการแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงได้ ดังนี้

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

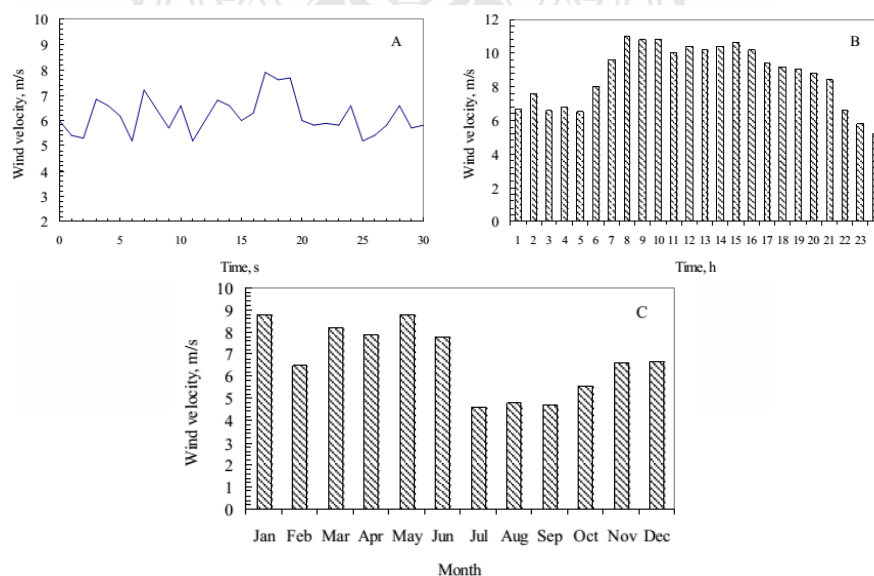
กำหนดให้ $V(Z_R)$ = ความเร็วลมที่ความสูง Z_R ซึ่งต้องการหา

$V(Z)$ = ความเร็วลมที่ความสูง Z ซึ่งทราบค่า

Z_0 = ความหยาบของพื้นผิว (Roughness Height)

2.3 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามเวลา

ความเร็วและทิศทางของลมจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา[1] ซึ่งทำให้กำลังและพลังงานที่ได้จากลมเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ในช่วงเวลาหนึ่งของวัน หรือการเปลี่ยนแปลงในรอบวันและการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล

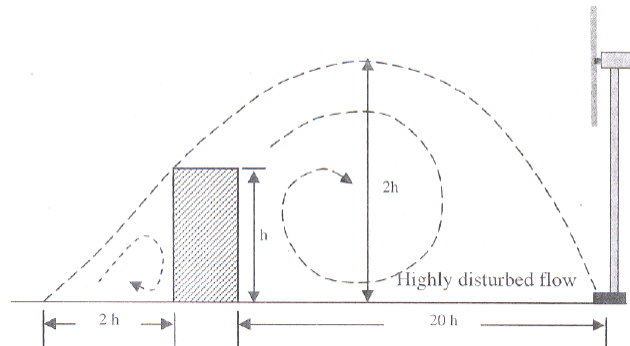


รูปที่ 2.5 แสดงการแปรค่าของความเร็วลมตามเวลา [1]

รูปที่ 2.5 (A) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในช่วงเวลา 30 วินาที ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าความเร็วลมจะมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 2 เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลาเพียง 30 วินาที การเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศอย่างรวดเร็ว สำหรับการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวัน (Diurnal Variation) รูปที่ 2.5 (B) ส่วนใหญ่เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสองบริเวณอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในรอบวัน ในด้านของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามฤดูกาล รูปที่ 2.5 (C) จะเป็นผลมาจากความแตกต่างของรังสีดวงอาทิตย์ที่บริเวณต่างๆ ของโลกได้รับ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

2.4 ความปั่นป่วนของลม

ความเร็วและทิศทางของลมเปลี่ยนแปลงได้ตามพื้นที่ผิวขรุขระ เช่น อาคาร ต้นไม้ และสิ่งกีดขวางต่างๆ การเปลี่ยนแปลงของทิศทางลมดังกล่าวเกิดจากความปั่นป่วนของการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แสดงความปั่นป่วนด้านเหนือลมและใต้ลมของสิ่งกีดขวาง การเกิดความปั่นป่วนนี้ไม่เพียงแต่จะส่งกำลังลมให้ลดลงแต่ยังลดแรงที่จะส่งไปยังกังหันลมอีกด้วย

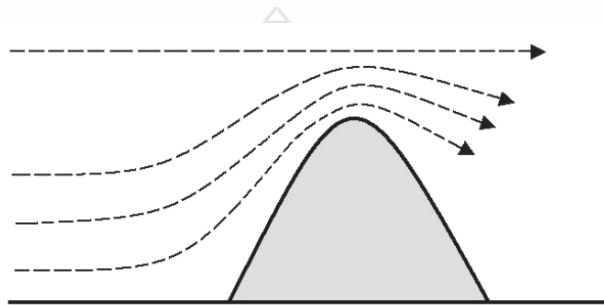


รูปที่ 2.6 การเกิดความปั่นป่วนของลมเมื่อเกิดสิ่งกีดขวาง [1]

ความรุนแรงของความปั่นป่วนขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงของสิ่งกีดขวาง ในทางธรรมชาติ บริเวณการเกิดความปั่นป่วนมีผลในแนวตั้งประมาณ 2 เท่าของความสูงของสิ่งกีดขวางและส่งผลในแนวราบ 20 เท่าทางด้านใต้ลม ดังนั้นก่อนทำการติดตั้งกังหันลม จะต้องมีการพิจารณาสิ่งกีดขวางต่างๆ รอบพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งกังหันลม โดยพื้นที่ดังกล่าวควรจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ปราศจากความปั่นป่วน

2.5 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม

สิ่งกีดขวางที่โถ้งมนจะเร่งกระแสลมที่พัดผ่าน รูปที่ 2.7 การเร่งนี้เกิดจากการบีบอัดของอากาศเหนือส่วนโถ้งนี้ ขนาดและทิศทางของความเร็วจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของส่วนโถ้ง เราสามารถใช้ผลกระทบดังกล่าวเพื่อช่วยเพิ่มพลังงานให้กับกังหัน พื้นลาดที่ทำมุมกับแนวราบ 16 องศา จะช่วยเพิ่มความเร็วลม สำหรับพื้นลาดที่ทำมุมมากกว่า 27 องศา หรือน้อยกว่า 3 องศา จะไม่ช่วยเร่งกระแสลม



รูปที่ 2.7 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม เมื่อพัดขึ้นเนินเขา [1]

2.6 กำลังงานจากลม

กำลังงานจากลม[1] เป็นพลังงานจากการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งอยู่กับสองตัวแปร ได้แก่ มวล (m_a) และความเร็ว (V_∞) ถ้ามวลของอากาศคงที่ ดังนั้นพลังงานลมจึงแปรผันตามความเร็วของลม สามารถเขียนสมการพลังงานของลมได้ในรูปของพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของลมที่เคลื่อนที่ไป เขียนได้ตามสมการที่ 2.2 ดังนี้

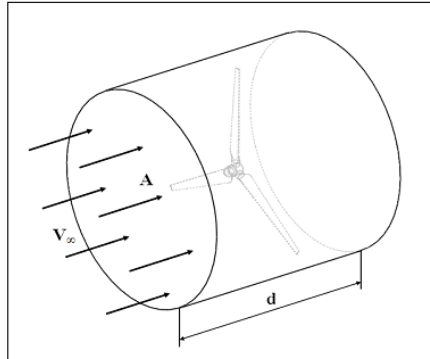
$$E_K = \frac{1}{2} m_a V_\infty^2 \quad (2.2)$$

กำหนดให้ E_K = พลังงานจลน์ [J]

m_a = มวลของอากาศ [kg]

V_∞ = ความเร็วลม [m/s]

มวลของลมที่เคลื่อนที่ไปดังแสดงในรูปที่ 2.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลลม ด้วยความเร็ว (V_∞) ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) และเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง (d) ดังนั้น มวลของอากาศสามารถคำนวณได้จาก ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_a) คูณด้วยปริมาตร ($A \times d$)



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ [1]

กำลังงานจากลม (Wind Power) คือ งานที่ลมทำได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา กำลังงานจากลมจึงเป็นไปตามสมการที่ 2.3

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 \quad (2.3)$$

กำหนดให้ P_a = กำลังงานที่ได้จากลม [Watt]

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

A = พื้นที่หน้าตัด $[m^2]$

V_∞ = ความเร็วลม $[m/s]$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 เห็นได้ว่ากำลังงานของลมเยอะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วของลมและพื้นที่หน้าตัดที่รับลม โดยจะพิจารณาความเร็วของลมเป็นหลักเนื่องจากกำลังงานของลมนั้นแปรผันตามความเร็วยกกำลังสาม

2.7 กำลังงานจากกังหันลม (Power Wind Turbine)

สำหรับค่ากำลังงานเฉลี่ยของกังหันลม[4] สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 C_p \quad (2.4)$$

กำหนดให้ P_w = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม [Watt]

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

V_∞ = ความเร็วลมเข้าใบพัด

C_p = ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม

A = พื้นที่กวาดใบกังหันลม $[m^2]$

จากสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ากำลังงานของกังหันลม จะมีการคิดค่าประสิทธิภาพของกังหันลมด้วยซึ่งในปฏิบัติจริงแล้วยังมีค่าความสูญเสีย (Losses) ในส่วนต่างๆ ของระบบอีกหลายส่วน เช่น ใบกังหันลม ระบบส่งกำลัง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งทำให้เมื่อมีการใช้จริงๆมีประสิทธิภาพในการทำงานแค่ 35% เท่านั้นเอง

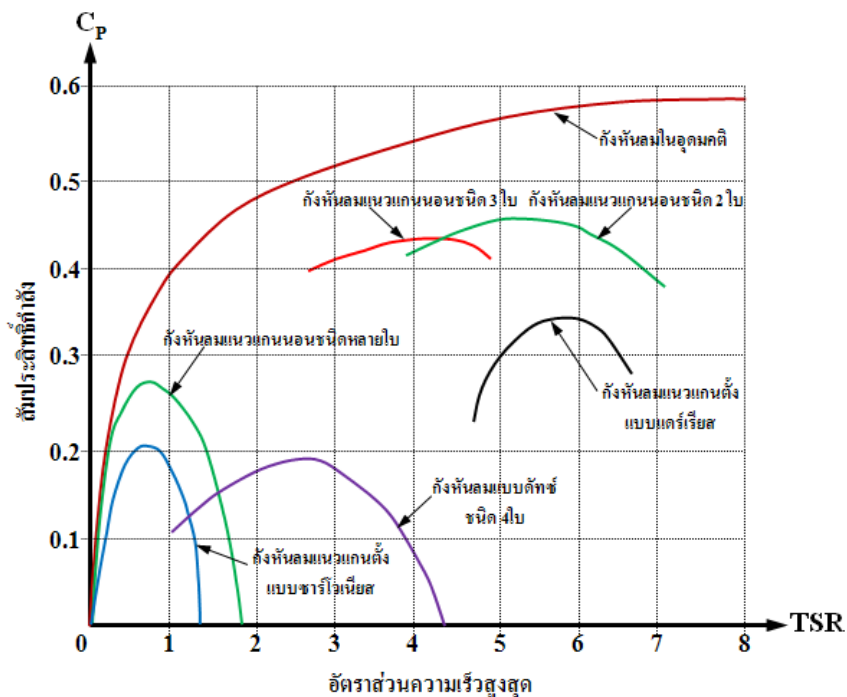
2.8 ประสิทธิภาพกังหันลม (Power Coefficient)

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพกังหันลม[4] เรียกว่าค่า c_p (Power Coefficient) [1] โดยจะได้รับการเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่ได้จากกังหันลมได้ดึงเอาไว้ P_w (Power Wind Turbine) เปรียบเทียบกับกำลังลมจาก ที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ p_a (Wind Power) ถ้าวิเคราะห์ทางกลคือ กำลังงาน เท่ากับ พลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบนั่นเอง ประสิทธิภาพกังหันลม (Power Coefficient) เป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ได้ออกมาจากกังหันลมต่อกำลังงานของลม หรือหมายถึงประสิทธิภาพของกังหันลมในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้า เป็นไปตามสมการที่ 2.5

$$C_p = \frac{P_w}{p_a} = \frac{P_w}{\frac{1}{2} A V_\infty^3 \rho_a} \quad (2.5)$$

กำหนดให้ C_p = ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม
 P_w = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม [Watt]
 P_a = กำลังงานที่ได้จากลม [Watt]

จากสมการที่ 2.5 เราจะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า $C_{p_{max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 หรือ 16/27 นั่นคือ ถ้าลมให้พลังงานมา 100% กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26% เนื่องด้วยปัจจัยหลายๆอย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 เห็นถึงลักษณะประสิทธิภาพ (Power Coefficient) ของกังหันลมชนิดต่างๆ ว่าไม่มีกังหันลมชนิดใดที่สามารถออกแบบได้ถึง 45% แต่อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบชุดกังหันลมให้มีประสิทธิภาพรวมได้ถึง 30-35% ก็ถือว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูง เนื่องจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ไม่ใช่การสันดาปเหมือนกับเครื่องยนต์ความร้อน ทำให้ไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะเป็นพลังงานที่สะอาดและจะไม่มีวันหมดเหมือนพลังงานจากเชื้อเพลิงสารไฮโดรคาร์บอนที่จำเป็นต้องใช้การเผาไหม้ในการได้งานมานั่นเอง ดังนั้นการออกแบบระบบทางกลให้กับกังหันลมจึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับศักยภาพแหล่งลมในแต่ละพื้นที่ด้วย



รูปที่ 2.9 ประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่าง ๆ [4]

2.9 ประเภทของกังหันลม

กังหันลมโดยทั่วไปจะมีรูปแบบพื้นฐานหลักๆ คล้ายๆกัน แต่อาจแตกต่างกันบ้างในส่วน ของรายละเอียด ดังนั้นการแบ่งประเภทของกังหันลมมักจะยึดเอาลักษณะการวางตัวของแกนเพลลา ของกังหันลมเป็นหลัก ซึ่งประเภทหลักๆของกังหันลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ กังหัน ลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอนและกังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.10

2.9.1 กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอน [5]

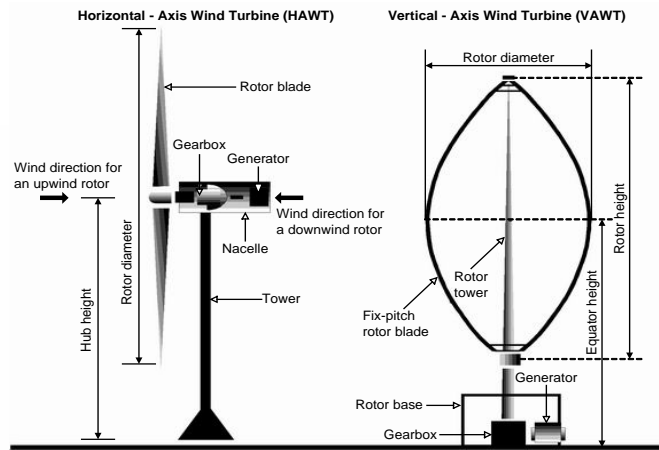
กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอน (Horizontal-Axis Type Wind Turbine, HAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนวางตัวอยู่ในทิศขนานกับทิศทางของลม โดยมีใบเป็นตัวตั้งฉากรับ แรงลม กังหันลมประเภทนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการนำมาใช้งานมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงแต่ต้องติดตั้งบนเสาที่มีความสูงมากและมีชุด ควบคุมให้กังหันลมหันหน้าเข้ารับแรงลมได้ทุกทิศทางในแนวนอนตลอดเวลา อย่างไรก็ตามใน รายละเอียดของรูปแบบ องค์ประกอบ และลักษณะการทำงานของกังหันลมแบบนี้ที่นิยมใช้กัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ [5] ได้แก่

2.9.1.1 กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (Fixed Speed Turbine) กังหันลมชนิดนี้ ประกอบไปด้วยใบพัด กล่องเกียร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (Squirrel Cage Induction Generator) ชุดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่ง ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.11 a ในความเป็นจริงแล้วกังหันลมแบบนี้มีค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Slip) ไม่คงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าน้อยมาก เพียง 1 – 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเรียกกังหันลมแบบนี้ว่าเป็นแบบ ความเร็วคงที่

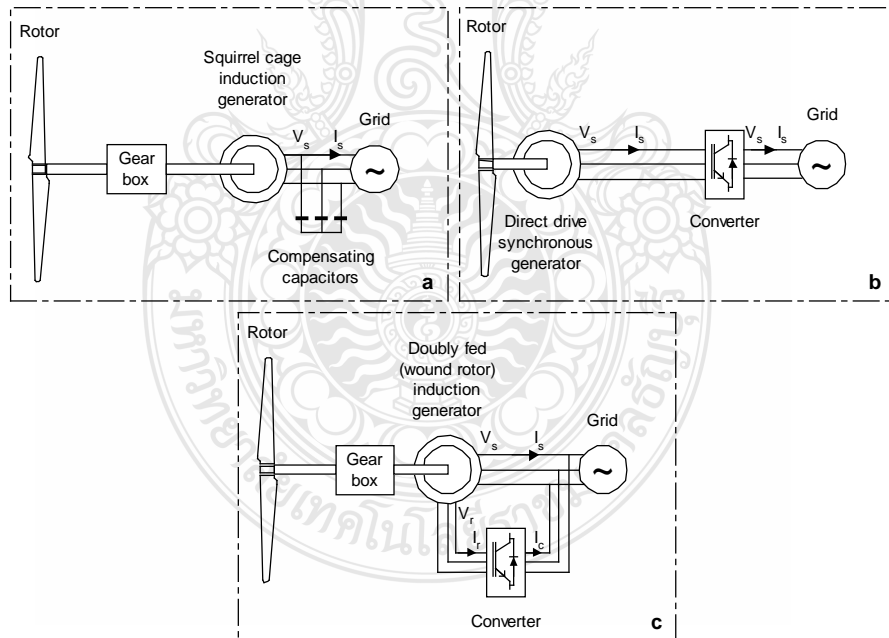
2.9.1.2 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable Speed Turbine) กังหันลมชนิดนี้ ประกอบไปด้วย ใบพัด กล่องเกียร์ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ล เฟด (Doubly Fed Induction Generator) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ชุดสเตเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสาย ส่งไฟฟ้า กังหันลมชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยเครื่องแปลง กระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออก มาได้ องค์ประกอบของกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.11 b

2.9.1.3 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (Variable Speed With Direct Drive) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรง

และมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า องค์ประกอบของกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรงดังแสดงในรูปที่ 2.11 c



รูปที่ 2.10 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนและแบบแกนตั้ง [5]



รูปที่ 2.11 แสดงองค์ประกอบกังหันลมแบบความเร็วคงที่ (a) กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (b) และกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (c) [5]

2.9.2 กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง

กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง (Vertical-Axis Type Wind Turbine, VAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของลม ซึ่งสามารถรับลมได้ทุกทิศทางและติดตั้งอยู่ในระดับต่ำได้ กังหันลมแบบนี้ที่รู้จักกันดีคือกังหันลมแบบแดร์เรียส (Darrieus) ซึ่งออกแบบโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสในปี ค.ศ. 1920 ข้อดีของกังหันลมแกนตั้งคือ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง มีชุดปรับความเร็ว (Gear Box) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถติดตั้งอยู่ที่ระดับพื้นล่างได้ นอกจากนี้ตัวเสาของกังหันลมยังไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับกังหันลมที่มีแกนเพลลาแบบแกนนอน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการใช้งานอยู่น้อย

2.10 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหล

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้ เลือกใช้โปรแกรม CFD ซึ่งเป็นการนำความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของไหลรวมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาช่วยในการออกแบบกังหันลมโดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) มาใช้ ซึ่งในหลักการทางวิศวกรรมของไหลเรียกว่า Computational Fluid Dynamics (CFD) หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับ ซึ่งสมการทางพลศาสตร์ของไหลที่นิยมนำมาใช้มีด้วยกัน 3 สมการคือ 1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) 2. สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equation) และ 3. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation Equation) และด้วยเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ซึ่งมีหน่วยประมวลผล (CPU) และหน่วยความจำ (Memory) ที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) และการทำงานของโปรแกรมการคำนวณของ CFD ทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สามารถวิเคราะห์ปัญหาต่างๆด้านกลศาสตร์ของของไหลที่ไหลผ่านรูปทรงที่มีความยุ่งยากซับซ้อนได้ (Complexity of Geometry) หรือไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้านของไหลต่างๆ เช่น

- ของไหลที่สามารถอัดตัวได้ (Compressible Fluid) เช่น การวิเคราะห์การไหลในระบบท่อของระบบการทำความเย็นหรือปรับอากาศ (Incompressible Fluid) เช่น การไหลของน้ำในระบบท่อภายในอาคาร

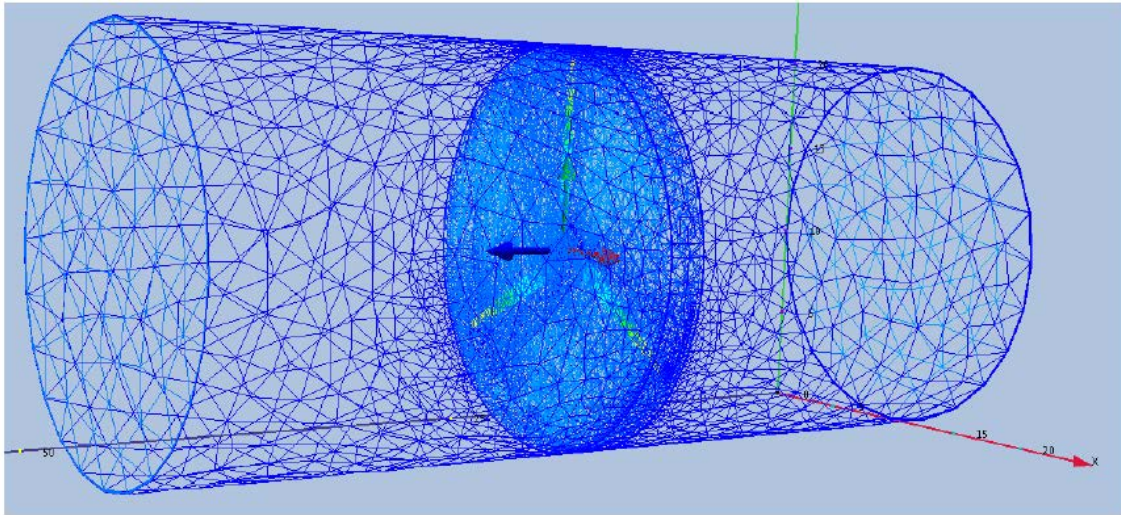
- ของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible Fluid) เช่น การไหลของน้ำในระบบท่อภายในอาคาร

- ของไหลที่มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar)

- ของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Fluid Flows) เป็นต้น

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม CFD นั้นประกอบด้วย สมการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity Equation) หรือสมการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) สมการที่คำนึงถึงโมเมนตัม หรือรู้จักเป็นอย่างดีในทาง CFD ก็คือ Navier-Stokes Equations และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations) นำทั้งสามสมการมาจัดรูปรวมกันเป็นสมการเรียกว่า Non-linear Partial Differential Equation (PDE) มาใช้สำหรับวิเคราะห์การไหลแบบต่างๆในทางวิศวกรรม

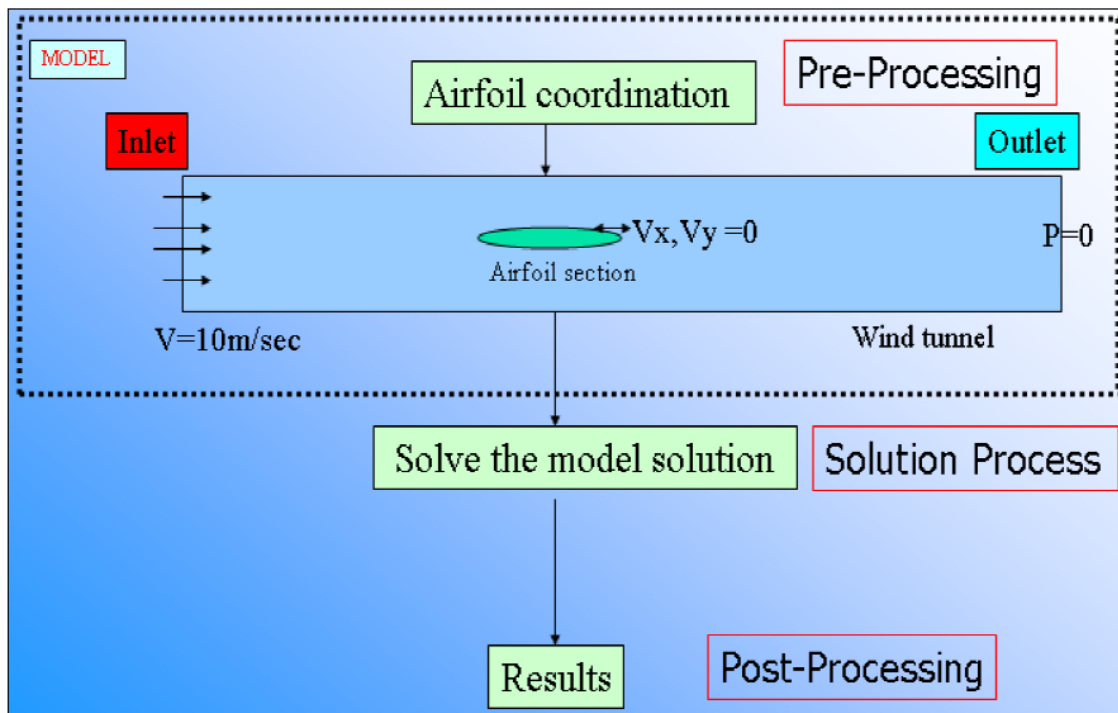
หลักการงานโดยทั่วไปของการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆใน CFD คือ การใช้หลักการแทนที่ (Discretization) เพื่อเปลี่ยนสมการต่อเนื่องไปเป็นสมการไม่ต่อเนื่อง ลดความยุ่งยากของสมการ Partial Differential Equation (PDE) ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางฟิสิกส์ไปเป็นสมการทางพีชคณิต (Set of Algebraic Equation) ซึ่งอยู่ในรูปแบบอย่างง่ายในการหาผลเฉลย คือ บวก ลบ คูณ หาร เท่านั้น CFD เรียกวิธีการนี้ว่า Discretization ซึ่งจะสามารถทำได้โดยต้องใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณเท่านั้น คำตอบที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณ (Approximate Solution) หลักการ Discretization Method แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ ดังนี้ 1. Finite Difference Method (FDM) 2. Finite Element Method (FEM) ซึ่งในงานวิจัยนี้กล่าวถึงเฉพาะวิธีการ Finite Difference Method ซึ่งนิยมใช้มากที่สุดในการวิเคราะห์ทาง CFD ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ทาง CFD คือการสร้างโดเมนและขอบเขตของปัญหาที่จะนำมาวิเคราะห์ให้ครอบคลุม โดยการใช้ Grid หรือ Mesh โดยแต่ละจุดย่อยๆของ Grid จะถูกคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Differential Equation หรือที่เรียกว่า Navier-Stroke Equation เปรียบเทียบกับค่าทาง Finite Difference Approximation เพราะฉะนั้นค่าความแม่นยำของคำตอบจึงขึ้นอยู่กับขนาดของ Grid หรือ Mesh นั้นเอง



รูปที่ 2.12 ค่าความละเอียดของ Mesh ในโปรแกรม CFD [5]

อย่างไรก็ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นแค่ตัวอย่างในการวิเคราะห์เท่านั้น ยังมีอีกหลายปัญหาที่จำเป็นต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ต่างกันออกไปในการแก้ปัญหาทางด้าน CFD ซึ่งโปรแกรมการคำนวณทาง CFD นั้นมีขั้นตอนการทำงานอยู่ 4 ขั้นตอนหลัก นั่นคือ

1. เลือกการทำงาน (Preference)
2. ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ (Preprocessing Process)
3. ประมวลผลการคำนวณ (Solution Process)
4. แสดงผลการคำนวณและให้คำตอบ (Post Processing Process) ตัวอย่างเช่น การหาประสิทธิภาพของแรงยกตัว (Lift Force Coefficient) ของ Profiles ต่างๆในอุโมงค์ลมดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานโดยทั่วไปของโปรแกรม CFD [5]

2.10.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม CFDesign V.7

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม CFDesign V.7 มีด้วยกัน 6 ขั้นตอนดังนี้

2.10.1.1 CAD Integration คือ การเขียนแบบใน โปรแกรม 2 มิติ หรือ 3 มิติ เพื่อเป็นส่วนที่จะมาใช้วิเคราะห์ในโปรแกรม CFD สามารถเขียนแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Solid Work นามสกุล x_t File เช่นการเขียนแบบจำลองอาคาร แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

2.10.1.2 Mesh Generation คือ การกำหนดค่าความละเอียดในการทดสอบ ซึ่ง Mesh ที่ใช้ในแต่ละส่วนของระบบอาจมีค่าเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ซึ่งส่วนมากชิ้นส่วนที่เราสนใจศึกษาคควรมีค่าความละเอียดมาก ส่วนที่เป็นองค์ประกอบไม่ค่อยสำคัญควรให้ค่าความละเอียดน้อยเพื่อลดเวลาการวิเคราะห์ผล ซึ่งโปรแกรม CFD สามารถสร้าง Mesh เป็นแบบอัตโนมัติสามารถปรับค่าความละเอียดได้

2.10.1.3 Simulation Scope คือ การกำหนดขอบเขตในการคำนวณ หรือกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับระบบการคำนวณของโปรแกรม เช่น การวิเคราะห์ความเร็วลมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านกลุ่ม

อาคารและกังหันลม ควรกำหนดขอบเขตทางเข้าลมและการไหลของลม CFDDesign จะทำการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ บนพื้นฐานของการเคลื่อนที่การไหลเป็นต้น

2.10.1.4 Simulation Speed คือ ความเร็วในการคำนวณ ประมวลผล กล่าวคือ เนื่องจากการสร้าง Mesh ที่เป็นแบบอัตโนมัติ จะทำให้การเข้ากันได้ของ Mesh ค่อนข้างดีและเหมาะสมกับชิ้นงานนั้นๆ จึงทำให้เกิดการรวดเร็วในการประมวลผล

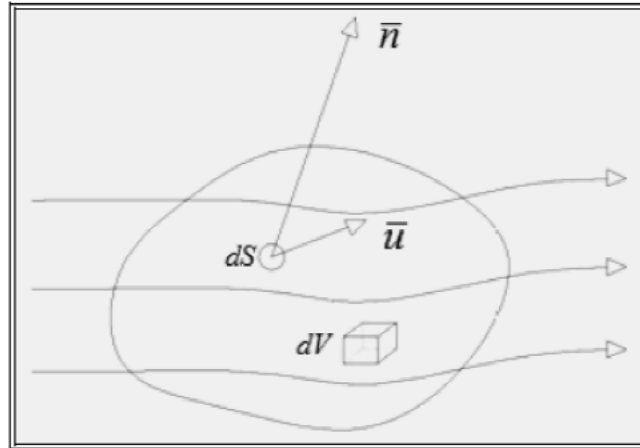
2.10.1.5 Design Review การแสดงผลที่ได้จากการคำนวณใน CFD นั้นจะสามารถที่จะแสดงเป็นแบบ Real Time กล่าวคือ ระหว่างที่ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยโปรแกรม CFD สามารถแสดงผลที่เกิดขึ้นได้ เช่น แสดงความเร็วลมขณะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดกังหันลม เป็นต้น

2.10.1.6 Design Communication สามารถแสดงผลในรูปแบบภาพนิ่ง ภาพเคลื่อนไหว วิดีโอ และสามารถทำงานร่วมกับ Microsoft Word ได้

2.10.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลใน CFDesign V.7 [5]

การสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพื่อใช้อธิบายลักษณะของการไหลภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยทั่วไปมีสมการที่ใช้แก้ปัญหการไหลมักสอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์ดังนี้กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) สมการที่ใช้วิเคราะห์ตามกฎอนุรักษ์ทั้ง 3 นี้มีรูปแบบเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นประกอบไปด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าหลายตัวได้แก่ ตัวแปรความเร็วลมในทิศทางต่างๆ ตัวแปรความดัน ตัวแปรความหนาแน่น ตัวแปรอุณหภูมิเป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านกังหันลมผลิตไฟฟ้า จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะเกิดการไหล ดังนั้นจึงใช้เพียงกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) มาวิเคราะห์

2.10.2.1 กฎอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมของการไหลแบบต่อเนื่องในสมการการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.14 แสดงถึงการส่งถ่ายของมวลเข้าสู่ระบบและออกจากระบบ ซึ่งเรียกลักษณะนี้ว่าปริมาตรควบคุม เป็นไปตามหลักอนุรักษ์มวลคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่ไหลผ่านผิวควบคุม



รูปที่ 2.14 ปริมาตรควบคุม [5]

สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.6)$$

กำหนดให้ $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น ณ ตำแหน่งก้อนมวลที่พิจารณา
 $\nabla \cdot (\rho \bar{u})$ คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟลักซ์ของมวลที่ผ่านก้อนมวลในทิศทาง x, y

สมการที่ 2.6 คือสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) เมื่อพิจารณาการไหลในท่ออุโมงค์ลม ให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) พบว่าความหนาแน่นของอากาศคงที่ จะสามารถหาสมการความต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

2.10.2.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเป็นการประยุกต์ใช้กฎข้อที่ 2 ของนิวตันและเมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมจะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมปริมาตรควบคุมเท่ากับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม
 อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมปริมาตรควบคุม = ผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมกับ โมเมนตัมสุทธิที่ไหลผ่านผิวควบคุม ดังสมการที่ (2.8)

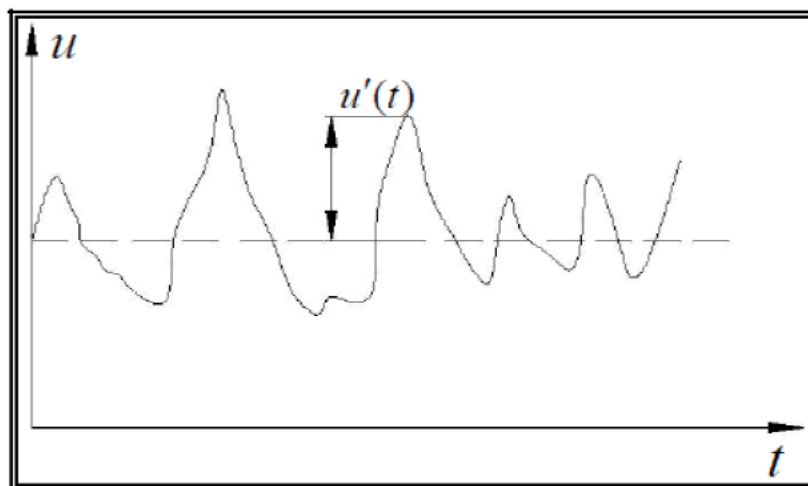
$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \bar{u} dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) \quad (2.8)$$

แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดแรกเป็นแรงเนื่องจากสนามดึงดูด (Field Force) ซึ่งได้แก่ แรงโน้มถ่วงโลก (Body Force) และแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดที่สองเป็นแรงที่กระทำต่อผิว (Surface Force) ซึ่งแบ่งออกเป็นแรงในแนวตั้งฉาก ได้แก่ ความดัน ความเค้นอัดหรือดึง แรงในแนวขนานกับผิว ได้แก่ ความเค้นเฉือน

สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม CFDDesign V.7 คือ สมการของ Navier Stokes หรือสมการโมเมนตัม และจากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ได้สมการความต่อเนื่องดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial pu}{\partial x} + \frac{\partial pv}{\partial y} + \frac{\partial pw}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

2.10.3 การไหลแบบปั่นป่วนใน CFD ค่าของตัวแปรต่างๆมีค่าไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่เปลี่ยนไป เช่น ความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แสดงค่าความเร็ว u ในการไหลแบบปั่นป่วนลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้มีความยุ่งยากในการคำนวณค่าตัวแปร เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายขึ้นจึงสมมติให้คุณสมบัติต่างๆที่พิจารณาแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนปริมาณเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น \bar{u} หรือ \bar{p} กับส่วนที่กระเพื่อม (Fluctuation) เช่น $u'v'$ หรือ ρ'



รูปที่ 2.15 ค่าความเร็ว u ในการปั่นป่วน [5]

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆ ในสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่ง ทำให้เกิดตัวแปรขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่รู้ค่ามากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Mode) เข้ามาช่วยเพื่อทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาแบบปิด (Close Problem) ให้สามารถหาผลเฉลยได้

สมการบังคับการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ มีอนุกรมกึ่งที่และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ประกอบด้วย

2.10.3.1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.9)$$

2.10.3.2 สมการ นาเวีย สโตคส์

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.10)$$

2.10.4 แบบจำลองการปั่นป่วน การหาผลเฉลยสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวีย สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (RANS) ต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนของในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเรโนลด์ซึ่งจะช่วยให้ไม่ต้องหาค่าการผันแต่จะสนใจเฉพาะค่าเฉลี่ยเท่านั้น สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้น จึงจะช่วยให้สามารถหาคำตอบได้อย่างแม่นยำ ใช้ระยะเวลาและหน่วยความจำน้อยที่สุด ตัวอย่างแบบจำลองความปั่นป่วนมีด้วยกันหลายแบบ เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$ แบบจำลองความปั่นป่วน The Shear – Stress Transport (SST) $k - \omega$ แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RAM) เป็นต้น สำหรับในหัวข้อวิจัยนี้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$

2.10.5 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ถูกสร้างขึ้น โดย Launder and Spalding ซึ่งจะใช้สมมุติฐานของบอัสซิเนส (Boussinesq Hypothesis) เพื่อประมาณค่าความเค้นของเรย์โนลด์ ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.11)$$

เมื่อ k คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i = \frac{1}{2} (\overline{u'^2 + v'^2 + w'^2}) \quad (2.12)$$

μ_t คือ ค่าความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent Eddy Viscosity)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

กำหนดให้ ε คือ อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (Turbulent Dissipation Rate)

C_μ คือ ค่าคงที่

รูปแบบสมการที่ใช้สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$ มีดังนี้

2.10.5.1 สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.14)$$

2.10.5.2 สมการอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.15)$$

กำหนดให้ σ_k และ σ_ε คือ Prandtl Number ของการไหลแบบปั่นป่วน $k - \varepsilon$

G_k คือ เทอมการสร้างการปั่นป่วน (Turbulent Production)

$$G_k = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.16)$$

เมื่อประยุกต์ใช้สมมติฐานของบุงชินเนสจะได้ว่า

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.17)$$

เมื่อ S คือ เทนเซอร์ความเครียด (Train Tensor) หาได้จาก

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.18)$$

และ S_{ij} คือ อัตราความเครียดเฉลี่ย (Mean Stain Rate) โดย

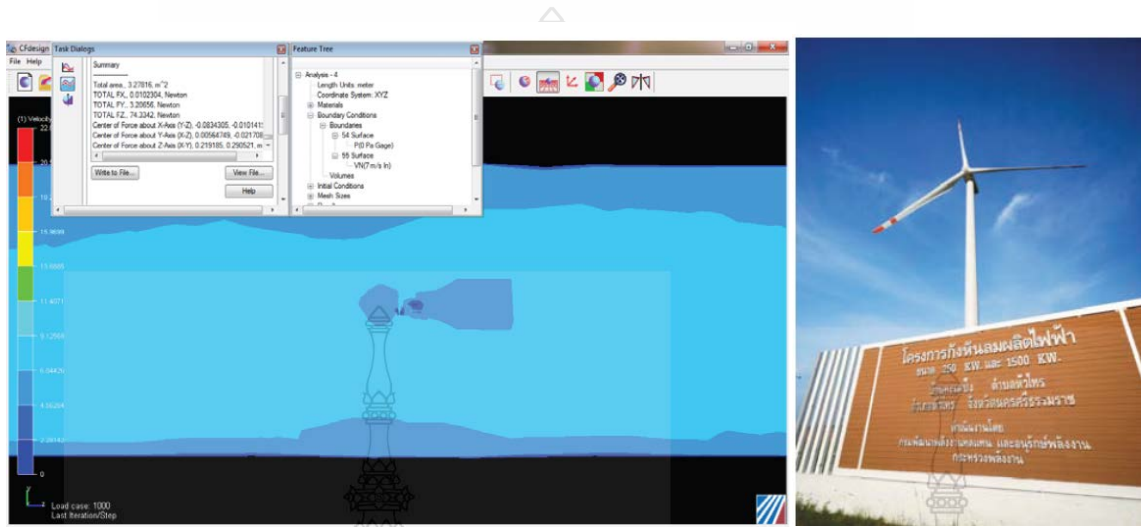
$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.19)$$

สำหรับค่าคงที่ในแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ซึ่งหาได้จากการทดลองต่างๆ ได้แก่

$$C_{1e} = 1.44, C_{2e} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

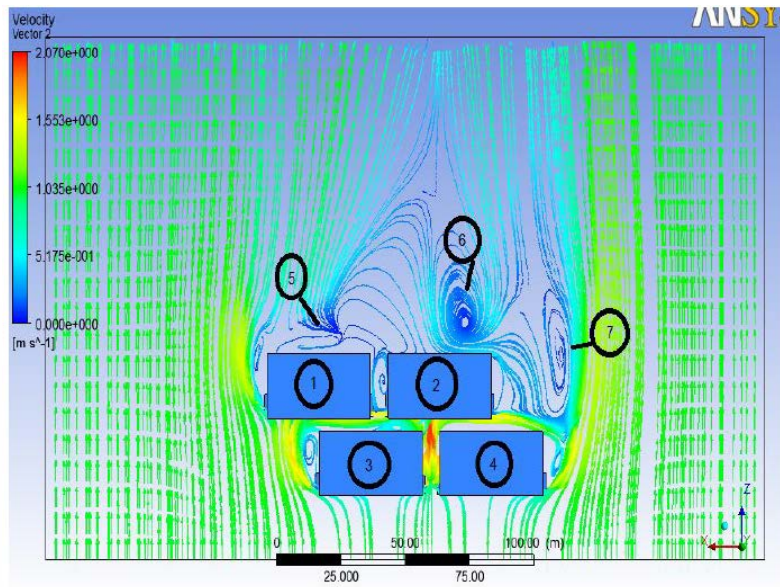
2.11.1 พินิจ สังข์ทอง ,2555 ได้วิเคราะห์การทำงานของกังหันลมและเปรียบเทียบความแตกต่างของความยาวใบกังหันลมแต่ละขนาดกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5MW เส้นผ่านศูนย์กลางใบ 77 m ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics,CFD)



รูปที่ 2.16 ผลวิเคราะห์ใบกังหันลมที่ความเร็วลม 7 m/s จากโปรแกรม CFD [5]

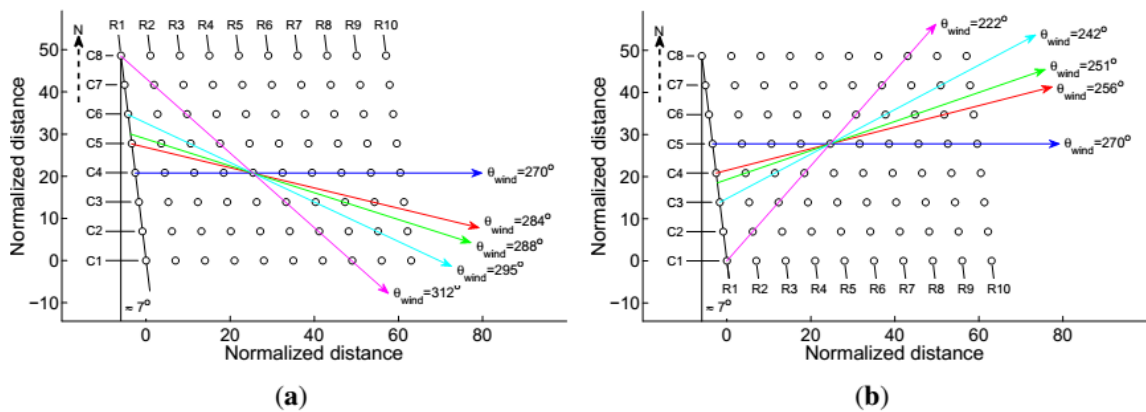
2.11.2 ดร.วิรัช ไรยนรินทร์[6] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,2551 ได้วิจัย โครงการศึกษาวิจัยพัฒนาสาริตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนนอน ขนาด 5กิโลวัตต์ ที่มีความเหมาะสมกับการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3-4 เมตร/วินาที จากการทดสอบ 1 เดือนสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 120 หน่วย ซึ่งสามารถทำงานได้ดีกว่ากังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยคิดประสิทธิภาพรวมอยู่ที่ 35 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่กังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ หากนำมาใช้งานที่ความเร็วลมต่ำประสิทธิภาพการทำงานเพียง 15-20 เปอร์เซ็นต์

2.11.3 นายพิรุฬห์ วันดีและคณะ,2556 ได้ศึกษาอิทธิพลของการจัดวางอาคารที่มีผลต่อความเร็ว ความดัน ที่กระทำภายนอกอาคาร รวมไปถึงรูปแบบการไหลของอากาศ โดยใช้โปรแกรมทางด้าน CFD คำนวณค่าความเร็วลมและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ



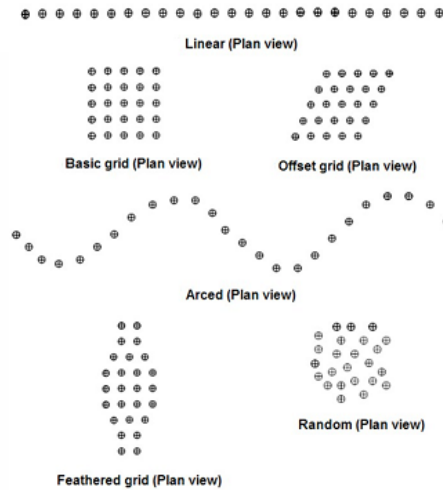
รูปที่ 2.17 Velocity streamline ของการจัดวางกรณี 7 และวิเคราะห์จากโปรแกรม CFD [7]

2.11.4 Yu-Ting Wu and Chang-Hung Chen, 2013 การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนทิศทางลมและวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานในฟาร์มกังหันลมขนาดใหญ่ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD



รูปที่ 2.18 ทิศทางต่างๆที่ใช้วิเคราะห์การสูญเสียพลังงานด้วยโปรแกรม CFD [8]

2.11.5 Nak Joon Choi, ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม CFD จากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างกึ่งหันลมของทุ้งกึ่งหันลมนอกชายฝั่งทะเล ขนาด 6 เมกะวัตต์



รูปที่ 2.19 การออกแบบรูปแบบฟาร์มกังหันลมที่ตำแหน่งต่างๆ [9]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน-ปี									
	ม.ค.- ต.ค. 2558	พ.ย.- ธ.ค. 2558	ม.ค.- ก.พ. 2559	มี.ค.- เม.ย. 2559	พ.ค.- มิ.ย. 2559	ก.ค.- ส.ค. 2559	ก.ย.- ต.ค. 2559	พ.ย.- ธ.ค. 2559	ม.ค.- ก.พ. 2560	
ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง										
สำรวจสถานที่ติดตั้งกังหันลมขนาด 5 kW										
จำลองโมเดล 3 มิติสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งกังหันลม										
วิเคราะห์ข้อมูลลม										
จำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรม CFD										
วิเคราะห์ผลการทดลอง										
สรุปผลการทดลอง										
เผยแพร่เอกสารงานวิจัย										
จัดทำเล่มรายงาน										

3.2 กล่าวนำ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการไหลของอากาศเมื่อเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มอาคารและหาตำแหน่งการติดตั้งกังหันลมที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ติดตั้ง ณ ศูนย์ฝึกอาคารบริเวณศูนย์ฝึกบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง ดำเนินงานวิจัยโดย วิเคราะห์การไหลของอากาศด้วยโปรแกรม CFDDesign V.7 เมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านอาคารทางด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ ก่อนถึงหน้าตัดโรเตอร์ของกังหันลม โดยมีรายละเอียดทางเทคนิคของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ดังนี้ [10]

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบ (Diameter)	6 m
พื้นที่ที่กวาดใบ (Swept Area)	28.27 m ²
จำนวนใบ	3 ใบ
ความสูงของคอกังหัน (Hub Height)	18 m
ความเร็วลมเริ่มผลิตไฟฟ้า (Cut-in Wind Speed)	2.5 m/s
ความเร็วลมหยุดทำงาน (Cut-Out Wind Speed)	12 m/s
ความเร็วลมที่ผลิตกำลังงานสูงสุด (Rated Wind Speed)	5 kW ที่ 9.5 m/s
ประเภทเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	Permanent magnet Generator
รูปแบบการเชื่อมต่อ	Grid Connected



รูปที่ 3.1 กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ติดตั้ง ณ ศูนย์ฝึกบุคลากรปิโตรเลียมพลังงานทางทหาร

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 3.3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 3.3.2 สำรวจสถานที่ติดตั้งกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์
- 3.3.3 จำลองโมเดล 3 มิติ สภาพแวดล้อมที่ติดตั้งกังหันลมด้วยโปรแกรม SolidWork
- 3.3.4 วิเคราะห์ข้อมูลลม
- 3.3.5 จำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรม CFD
- 3.3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.3.7 สรุปผลการทดลอง
- 3.3.8 จัดทำเล่มรายงาน

3.4 การวิเคราะห์การไหลของอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFD

โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CFDesign V.7 วิเคราะห์การไหลของอากาศ ภายในศูนย์ฝึกอบรมด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร ด้วยการจำลองขนาดความสูงของอาคาร รายละเอียดขนาดของอาคารดังแสดงในตารางที่ 3.2 ขั้นตอนมีดังนี้

3.4.1 กำหนดข้อมูลและตัวแปรต่างๆ

3.4.1.1 กำหนดความเร็วลมทางเข้าอุโมงค์ 10 m/s

3.4.1.2 กำหนดให้อากาศเป็นการไหลแบบคงที่ เคลื่อนที่ผ่านบริเวณด้านตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ไปทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

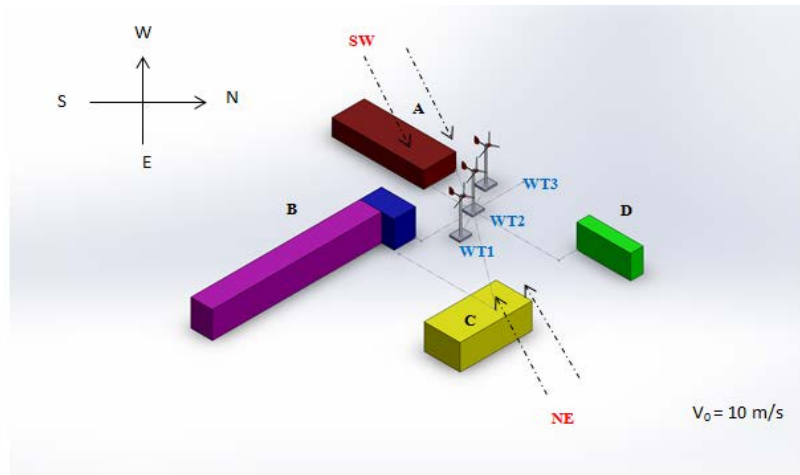
3.4.1.3 ตั้งค่าเมช (Mesh) ให้ปรับขนาดอัตโนมัติ

3.4.1.4 กำหนดของไหลขาเข้าเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (Steady Flow)

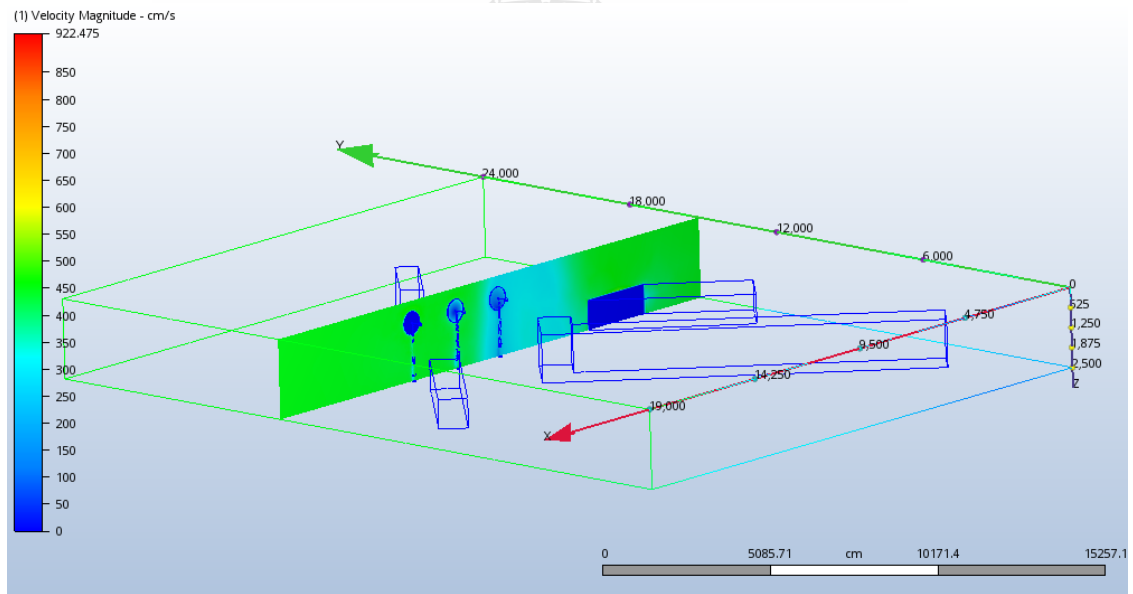
3.4.1.5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

ตารางที่ 3.2 ขนาดของอาคารและตำแหน่งการติดตั้งกังหันลม

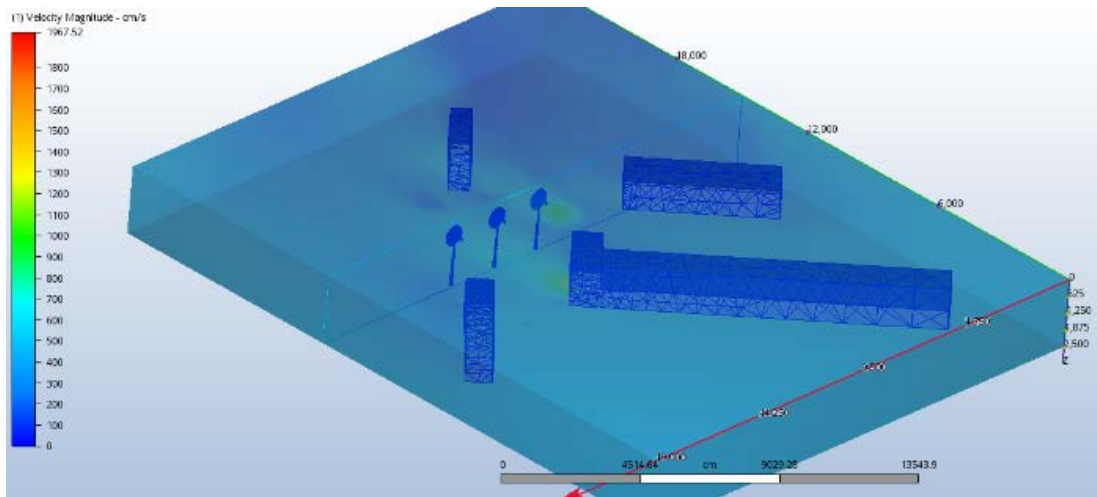
Building	Height (m)	Width (m)	Length (m)	Distance from WT1	Distance from WT2	Distance from WT3
A	9.25	18	51	35	24	20
B	15	12	113	25	30	45
C	9.25	18	51	60	70	87.5
D	13.3	7	30	47.5	50	55



รูปที่ 3.2 จำลองภาพ 3 มิติและทิศทางลมที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัย



รูปที่ 3.3 กำหนดทางเข้าลมทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)



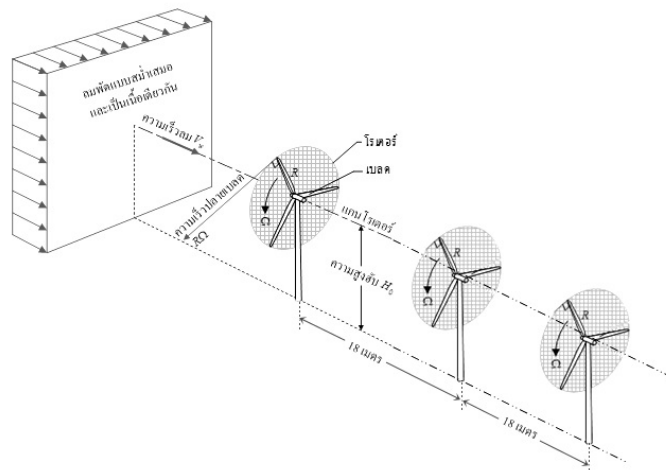
รูปที่ 3.4 กำหนดทางเข้าทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE)

3.5 วิเคราะห์การไหลของอากาศบริเวณหน้าโรเตอร์ของกังหันลม ที่ระยะ 12 , 18 และ 24 เมตร

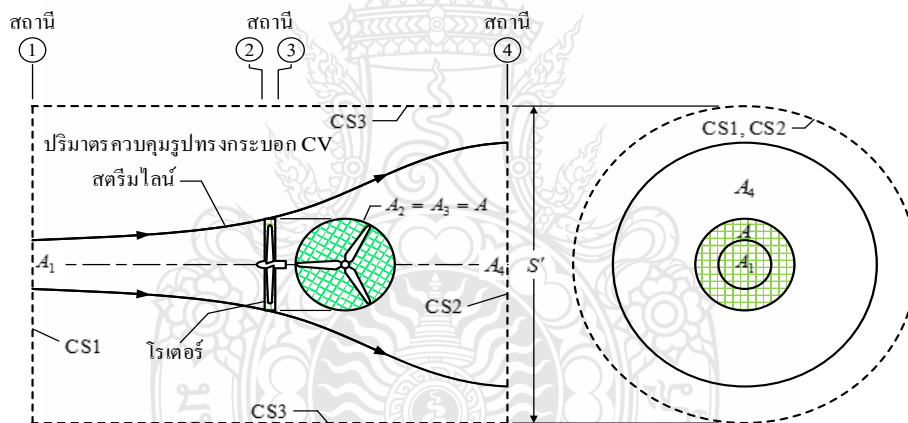
ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของอากาศบริเวณหน้าโรเตอร์ของกังหันลม ที่ระยะ 12 , 18 และ 24 เมตร ขั้นตอนดังนี้ 1. วิเคราะห์การไหลของอากาศ 2. กำหนดข้อมูลและตัวแปรต่างๆ 3. การวิเคราะห์การไหลของอากาศด้วยโปรแกรม CFD 4. แสดงผลและให้คำตอบ

3.5.1 วิเคราะห์การไหลของอากาศ

การวิเคราะห์การไหลของอากาศเมื่อเคลื่อนที่ผ่านหน้าโรเตอร์ของกังหันลมแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ ภายในสตรีมทิวและนอกสตรีมทิว โดยพิจารณาว่าโรเตอร์ของกังหันลมเป็นแผ่นวงกลมบางมากจนไม่มีแรงต้านการไหล มีเบรคเป็นอนันต์ (Infinity) และมีความเร็วปลายเบรค $R\Omega$ เร็วกว่าความเร็วลม V_w มาก มีการไหลของอากาศเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow) และเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 [11]



รูปที่ 3.5 ความเร็วลมกับความเร็วปลายใบ [11]



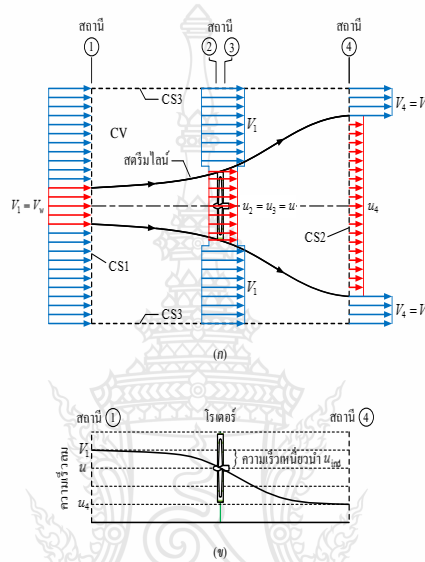
รูปที่ 3.6 ภาคตัดขวางของปริมาตรควบคุมรูปทรงกระบอก [12]

3.5.2 กำหนดข้อมูลและตัวแปรต่างๆ

กำหนดให้ปริมาตรควบคุม (Control Volume, CV) รูปทรงกระบอก (แทนด้วยเส้นประ) ปิดล้อมระบบซึ่งประกอบด้วยลมกับโรเตอร์ของกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ปริมาตรควบคุมมีผิวควบคุม (Control Surface, CS) จำนวนสามผิวคือ

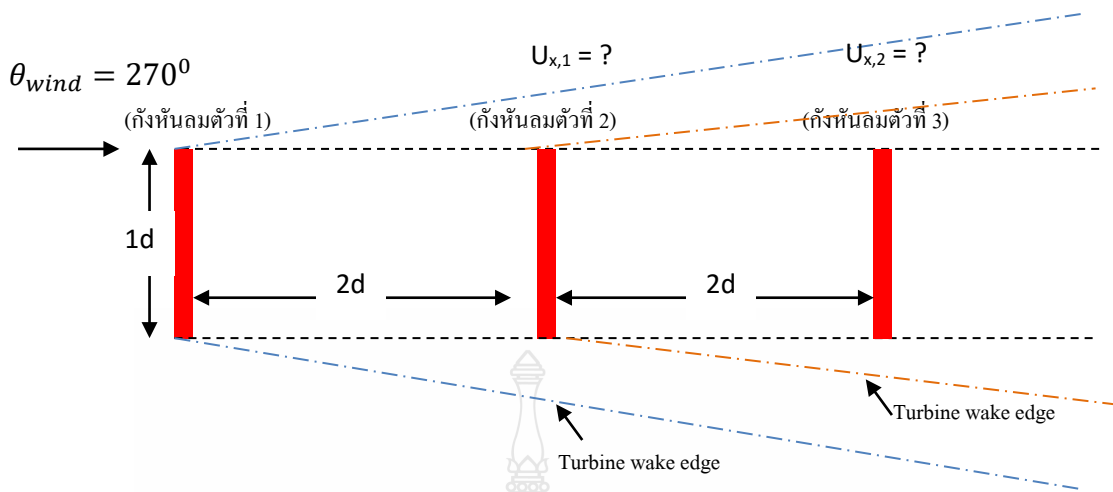
- ทางเข้าปริมาตรควบคุมที่ผิวควบคุม CS1 มีฐานวงกลม กำหนดให้เป็นสถานี ①
- ทางออกปริมาตรควบคุมที่ผิวควบคุม CS2 มีฐานวงกลม อยู่ที่สถานี ④
- ผิวควบคุม CS3 อยู่ที่ผิวของรูปทรงกระบอก

ในส่วนสถานี ② อยู่จุดผิวหน้าของโรเตอร์ และสถานี ③ อยู่จุดผิวหลังของโรเตอร์ เนื่องจากปริมาตรควบคุมถูกวางในแนวนอน ทุกสถานีจึงมีเฮดระดับ (Elevation Head) เท่ากับความสูงฮับ (Hub Height, H_0) และไม่มีแรงดันจากความเสียดทานที่โรเตอร์ ความเร็วลมที่สถานี ② และสถานี ③ จึงเท่ากัน นั่นคือ $u_2 = u_3 = u$ และกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น (จึงให้ u แทนความเร็วลมที่โรเตอร์) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก)

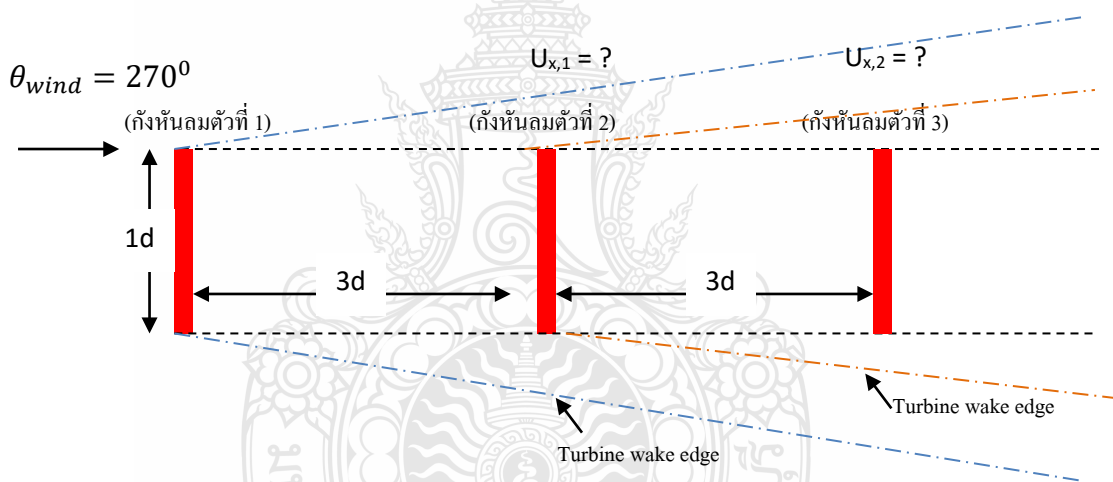


รูปที่ 3.7 แผนภาพความเร็วลม (ก) โปรไฟล์ (profile) ความเร็วลม (ข) ความเร็วลมในสตรีมทูป [13]

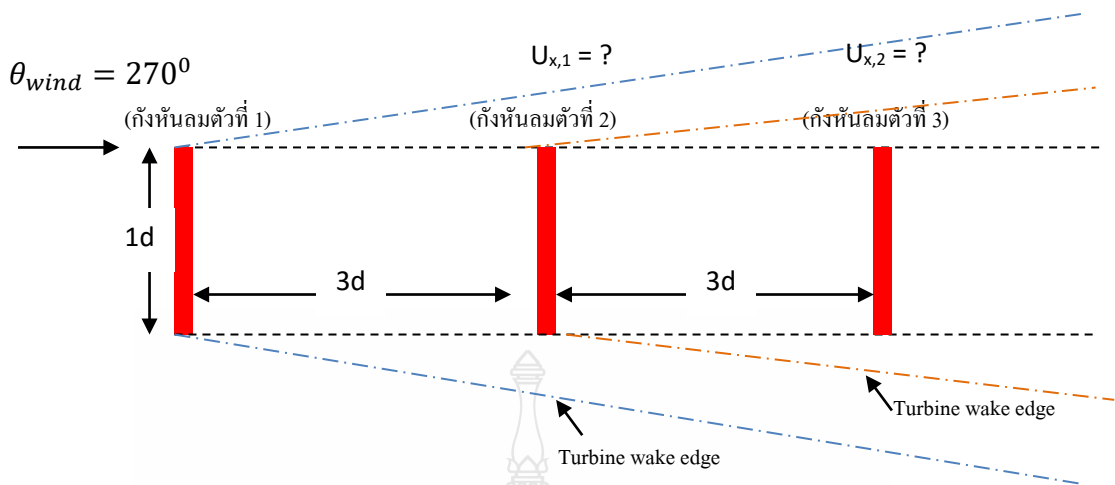
ลมที่สถานี ① มีความเร็ว V_1 หรือ V_w เรียกลมนี้ว่า ลมอัปสตรีม (Upstream Wind) หรือลมฟรีสตรีม (Freestream Wind), รอยลมหรือเวก (Wake) ที่สถานี ④ มีความเร็ว u_4 เรียกลมนี้ว่า ลมดาวน์สตรีม (Downstream Wind) วิเคราะห์ดูระยะทางการเคลื่อนที่ของลมที่ตำแหน่งการติดตั้งกังหันลมทั้ง 3 ตัว และวิเคราะห์ค่า u_4 ว่าค่าเท่ากับหรือใกล้เคียง ความเร็ว V_1 หรือมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศมากที่สุด ออกแบบภาพตัดขวางเพื่อดูการเคลื่อนที่ของลมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดโรเตอร์ของกังหันลมที่ระยะ 12,18,24 เมตร ได้ดังนี้



รูปที่ 3.8 วิเคราะห์การไหลของลมที่ระยะ $2d$ (12 เมตร)



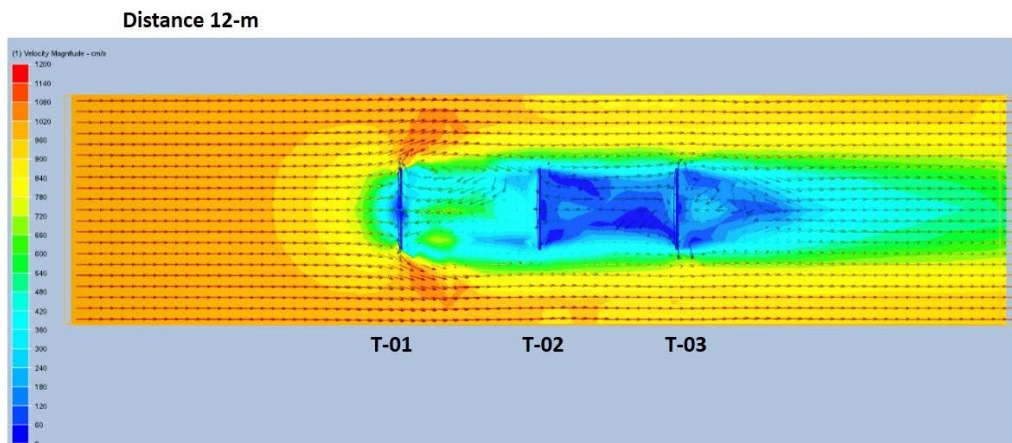
รูปที่ 3.9 วิเคราะห์การไหลของลมที่ระยะ $3d$ (18 เมตร)



รูปที่ 3.10 วิเคราะห์การไหลของลมที่ระยะ $4d$ (24 เมตร)

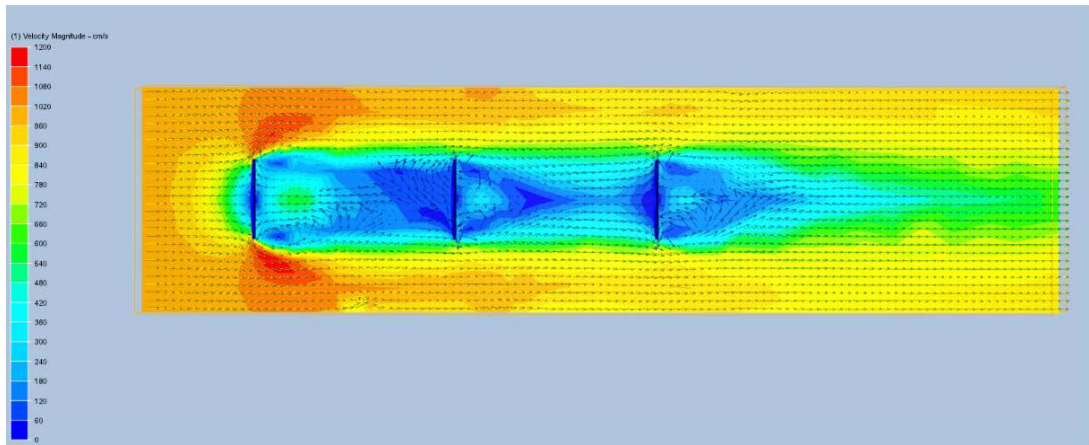
3.5.3 การวิเคราะห์การไหลของอากาศด้วยโปรแกรม CFD ที่ระยะ 12,18 และ 24 เมตร

การวิเคราะห์การไหลของอากาศด้วยโปรแกรม CFD แสดงดังรูปที่ 3.11, 3.12 และ 3.13 จากรูปโปรแกรมทำการวิเคราะห์ความเร็วลมที่ที่ปะทะกับหน้าตัดของกังหันลมทั้ง 3 ตัว ที่ระยะ 12,18 และ 24 เมตร จะเห็นค่าความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 3.11 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะห่างระหว่างเสากังหันลมเท่ากับ 12 เมตร

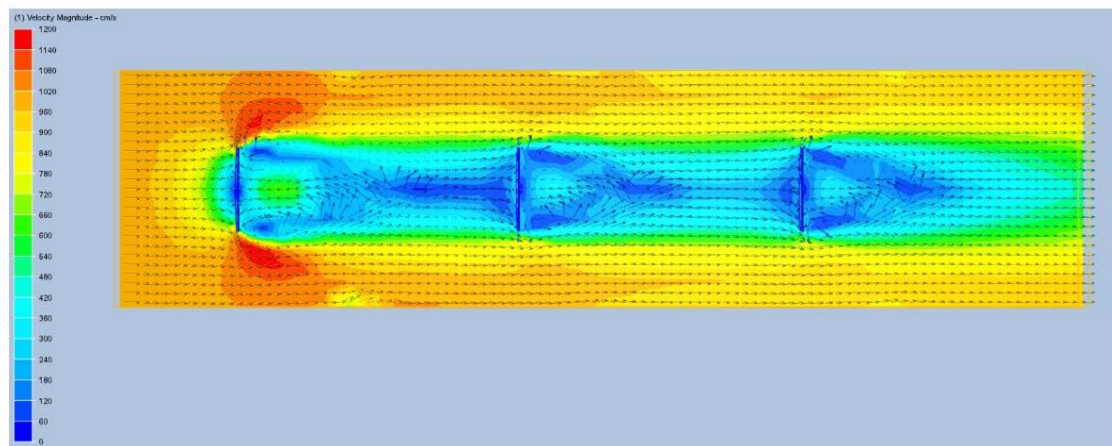
Distance 18-m



รูปที่ 3.12 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะห่างระหว่างเสาข้างหันลม เท่ากับ 18 เมตร



Distance 24-m

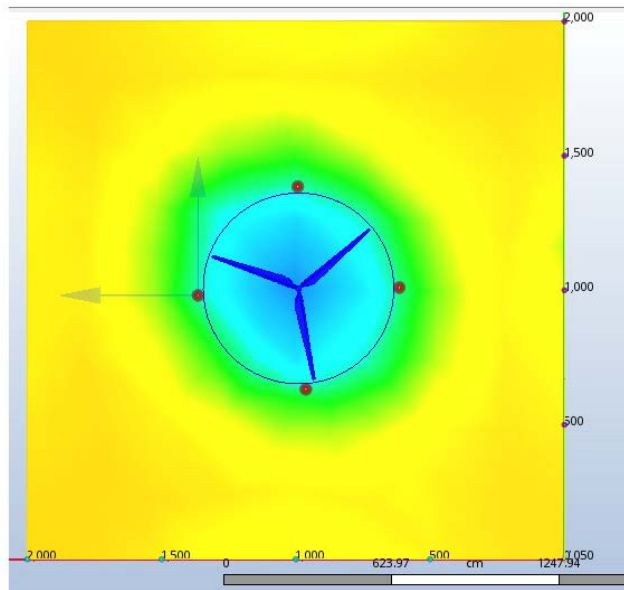


รูปที่ 3.13 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะห่างระหว่างเสาข้างหันลมเท่ากับ 24 เมตร

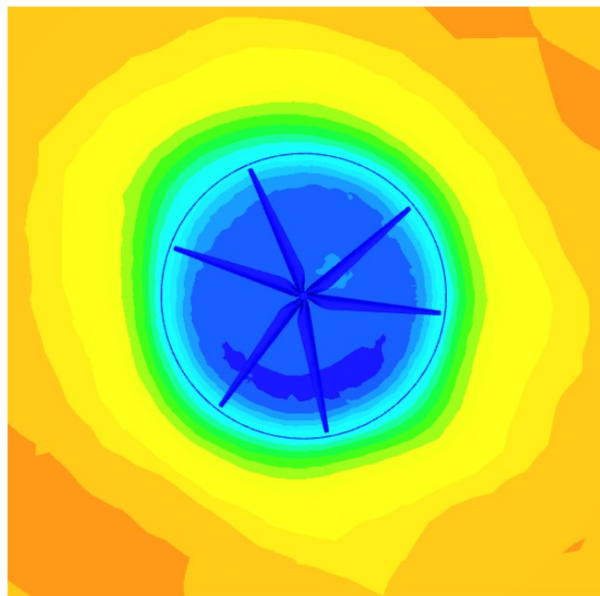
3.5.4 แสดงผลและให้คำตอบ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD จะแสดงผลของความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางการติดตั้งกันลม โดยความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 m/s แสดงผลของความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

Distance 18-m



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างความเร็วมที่ตำแหน่ง WT1 ที่ระยะ 18 เมตร

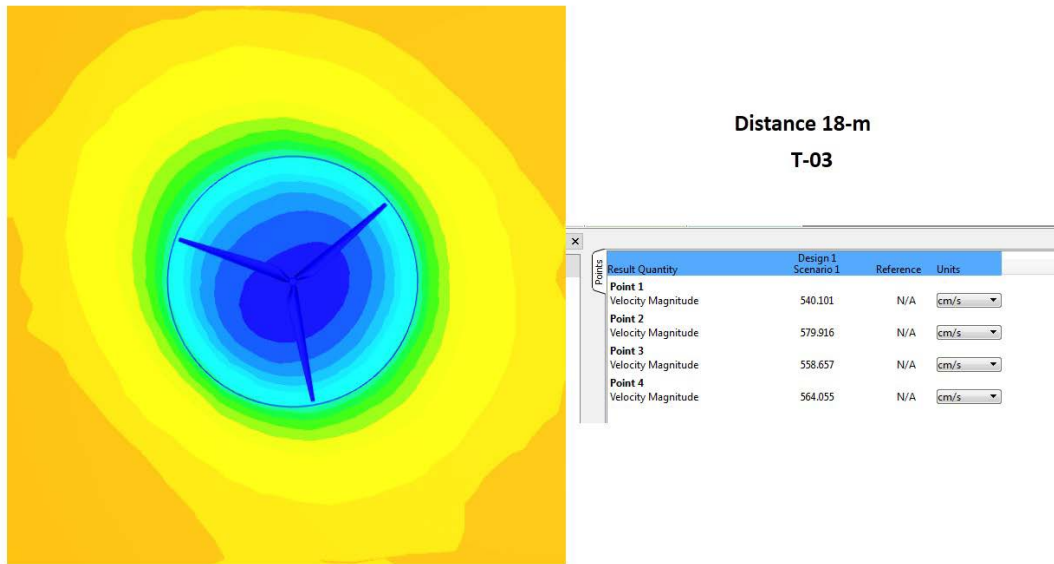


Distance 18-m

T-02

Points	Result Quantity	Design 1 Scenario 1	Reference	Units
Point 1	Velocity Magnitude	468.939	N/A	cm/s
Point 2	Velocity Magnitude	499.647	N/A	cm/s
Point 3	Velocity Magnitude	502.485	N/A	cm/s
Point 4	Velocity Magnitude	503.102	N/A	cm/s

รูปที่ 3.15 ตัวอย่างความเร็วมที่ตำแหน่ง WT2 ที่ระยะ 18 เมตร



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างความเร็วลมที่ตำแหน่ง WT3 ที่ระยะ 18 เมตร

3.6 ข้อมูลกำลังงานไฟฟ้าของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์

3.6.1 ข้อมูลกำลังงานไฟฟ้าของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ทำการวัดโดยบริษัทผู้ผลิตกังหันลม แสดงดังตารางที่ 3.3

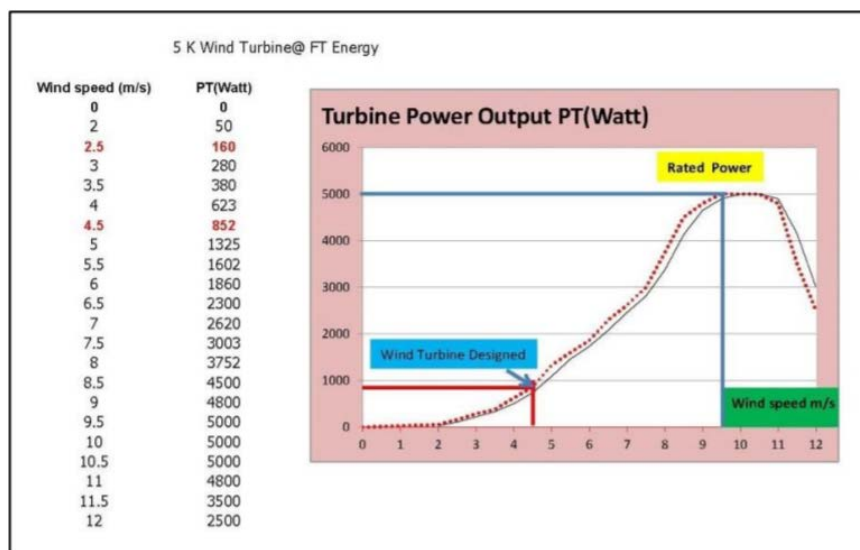
ตารางที่ 3.3 พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ผลิตได้ต่อปี

Wind Speed (m/s)	Power output (watt)	Energy output (kWh/day)	Energy output (kWh/year)
0	0	0	0
2	50	1.20	438.00
2.5	160	3.84	1,401.60
3	250	6.00	2,190.00
3.5	340	8.160	2,978.40
4	602	14.45	5,273.52
4.5	852	20.45	7,463.52
5	1325	31.80	11,607.00

ตารางที่ 3.3 พลังงานไฟฟ้าที่กั้นหั่นขนาด 5 กิโลวัตต์ ผลิตได้ต่อปี (ต่อ)

Wind Speed (m/s)	Power output (watt)	Energy output (kWh/day)	Energy output (kWh/year)
5.5	1602	38.45	14,033.52
6	1860	44.64	16,293.60
6.5	2300	55.20	20,148.00
7	2620	62.88	22,951.20
7.5	3003	72.072	26,306.28
8	3752	90.05	32,867.52
8.5	4500	108.00	39,420.00
9	4800	115.20	42,048.00
9.5	5000	120.00	43,800.00
10	5000	120.00	43,800.00

3.6.2 กราฟพลังงาน (Power Curve)



รูปที่ 3.17 Turbine Power Curve [14]

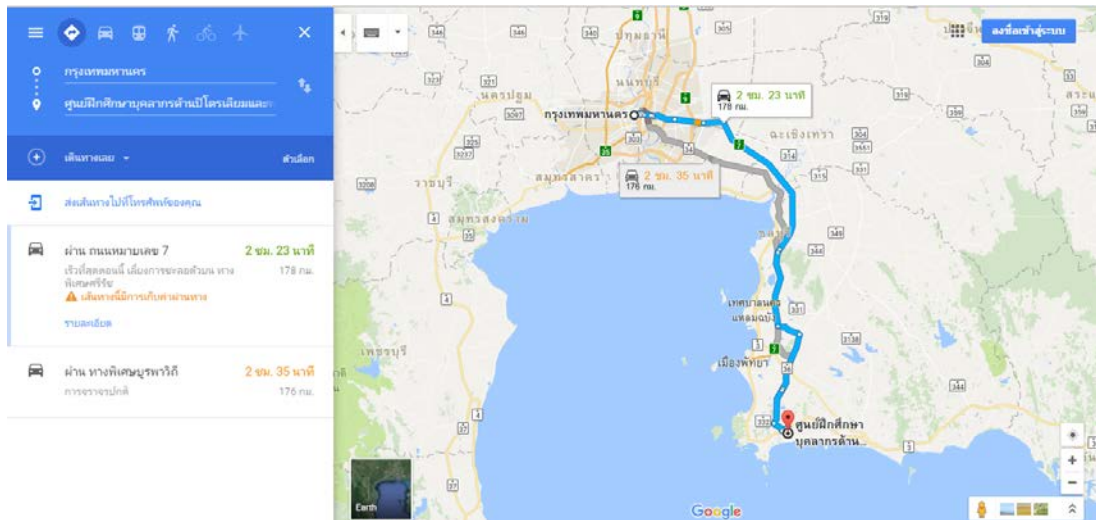
3.7 สถานที่ติดตั้งกังหันลมในงานวิจัย

กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ ติดตั้ง ณ ศูนย์ฝึกศึกษาบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง โดยศูนย์ฝึกศึกษาบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหารแห่งนี้ อยู่ภายใต้การดูแลของกรมการพลังงานทหาร ตั้งอยู่ในที่ดินของกองทัพเรือบนพื้นที่ 64 ไร่เศษ ซึ่งกระทรวงกลาโหมได้ขอใช้พื้นที่เพื่อก่อสร้างเป็นอาคารสำหรับศูนย์การเรียนรู้ด้านพลังงานทุกรูปแบบ เพื่อเผยแพร่และให้ข้อมูลความรู้กับกำลังพลของหน่วยงานทหารทั้ง 3 เหล่าทัพ นิสิตนักศึกษา รวมทั้งประชาชนทั่วไป โดยภายในศูนย์ฯแห่งนี้ ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนต่างๆ มาติดตั้งใช้ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายเพื่อทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าระบบสูบน้ำและผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

ศูนย์ฝึกศึกษาบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยองแห่งนี้ จะเป็นแหล่งเรียนรู้การใช้พลังงานทดแทน ซึ่งสามารถให้เห็นถึงความก้าวหน้าในการใช้พลังงานทดแทนของกองทัพ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการปฏิบัติการอีกทั้งยังเป็นการร่วมใจในการสนองตอบพระราชดำริที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ทรงพระราชทานแนวทางด้านพลังงานทดแทนที่ให้ประเทศชาติ เกิดความมั่นคงทางด้านพลังงาน อย่างยั่งยืนอีกด้วย



รูปที่ 3.18 สถานที่ติดตั้งกังหันลม



รูปที่ 3.19 แผนที่ตั้งโครงการ [15]

3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์เปรียบเทียบการไหลของอากาศเมื่อมีสิ่งกีดขวางการไหลกับไม่มีสิ่งกีดขวางการไหล

การวิเคราะห์เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ติดตั้งในบริเวณที่มีอาคารล้อมรอบ ควรมีผลของข้อมูลเปรียบเทียบดังนี้

3.8.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลลม

3.8.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้

3.8.3 ผลความสูงของอาคารที่มีผลต่อกังหันลมจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD

3.8.4 ผลของระยะห่างระหว่างเสากังหันลมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

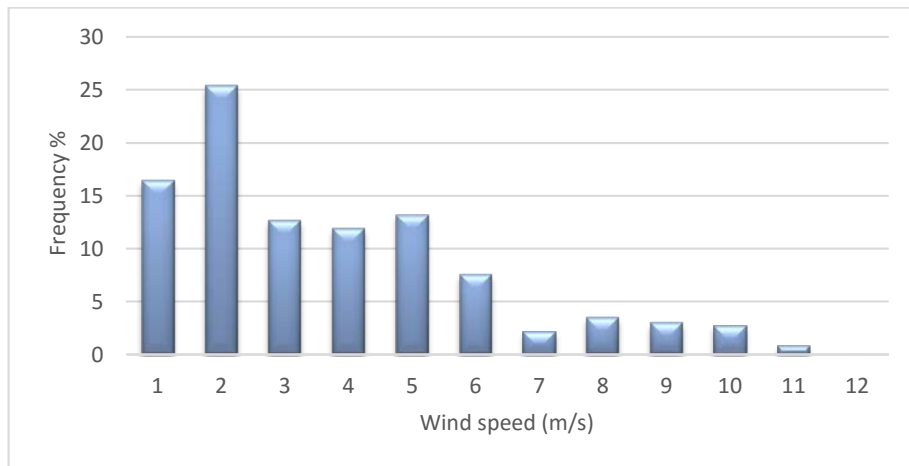
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากข้อมูลลมกรมอุตุนิยมวิทยา ช่วงระหว่างเดือนตุลาคม 2558 ถึงเดือน กันยายน 2559 เมื่อนำมาวิเคราะห์พบค่าความเร็วลมเฉลี่ยรายปีอยู่ที่ 3.75 m/s ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยเดือนที่มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่เดือน สิงหาคม มีค่าความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 6.55 m/s

ตารางที่ 4.1 ความเร็วเฉลี่ยรายเดือน

เดือน/ปี	ความเร็วลมเฉลี่ย m/s
ตุลาคม 2558	1.70
พฤศจิกายน 2558	1.70
ธันวาคม 2558	1.93
มกราคม 2559	2.81
กุมภาพันธ์ 2559	2.90
มีนาคม 2559	4.26
เมษายน 2559	5.13
พฤษภาคม 2559	5.06
มิถุนายน 2559	4.76
กรกฎาคม 2559	3.93
สิงหาคม 2559	6.55
กันยายน 2559	4.31
เฉลี่ย	3.75

การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมเฉลี่ยรายวัน ในช่วงเดือน ตุลาคม 2558 ถึง กันยายน 2559 ความถี่การเกิดลมส่วนใหญ่ความเร็วลมเฉลี่ยรายวันอยู่ที่ 2 m/s ดังแสดงรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของความเร็วลมเฉลี่ยรายวันในช่วงเดือนตุลาคม 2558 ถึง กันยายน 2559

ความเร็วลมสูงสุดระหว่างเดือนตุลาคม 2558 ถึงเดือน กันยายน 2559 แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยรายปี

เดือนปี	ความเร็วลมสูงสุดรายเดือน (m/s)
ตุลาคม 2558	9
พฤศจิกายน 2558	9
ธันวาคม 2558	9
มกราคม 2559	9
กุมภาพันธ์ 2559	9
มีนาคม 2559	10
เมษายน 2559	10
พฤษภาคม 2559	11
มิถุนายน 2559	15
กรกฎาคม 2559	13
สิงหาคม 2559	14
กันยายน 2559	11
เฉลี่ย	10.75

จากตารางที่ 4.2 เมื่อนำมาวิเคราะห์พบค่าความเร็วลมเฉลี่ยรายปีอยู่ที่ 10.75 m/s จึงกำหนดให้การศึกษาโครงการนี้ใช้ความเร็วลมที่ 10 m/s วิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม CFD

4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมที่ควรผลิตได้รายวันและรายปี

จำนวนชั่วโมงการเกิดลมเฉลี่ยในแต่ละเดือน เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ควรผลิตได้ ได้ค่า AEP เท่ากับ 5,944.92 kWh ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้

เดือน/ปี	ความเร็วลมเฉลี่ยรายวัน (m/s)	พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมควรผลิตได้ (kWh/year)	
		Energy output (kWh/day)	Energy output (kWh/month)
ตุลาคม 2558	1.70	1.02	31.65
พฤศจิกายน 2558	1.70	1.02	30.63
ธันวาคม 2558	1.93	1.49	46.31
มกราคม 2559	2.81	4.61	142.92
กุมภาพันธ์ 2559	2.90	5.07	146.96
มีนาคม 2559	4.26	16.06	497.97
เมษายน 2559	5.13	28.05	841.56
พฤษภาคม 2559	5.06	26.92	834.50
มิถุนายน 2559	4.76	22.41	672.29
กรกฎาคม 2559	3.93	12.61	390.98
สิงหาคม 2559	6.55	58.39	1,810.08
กันยายน 2559	4.31	16.64	499.08
AEP			5,944.92

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้สูงสุดคือเดือน สิงหาคม 2559 มีค่าเท่ากับ 1,810.08 kWh สอดคล้องกับความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุด โดยเดือนสิงหาคม 2559 มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดในรอบปีเท่ากับ 6.55 m/s

4.3 ผลของการประมาณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ผลิตได้

จากพลังงานไฟฟ้าบริษัทผู้ผลิตกังหันลมแสดงในตารางที่ 3.3 นำมาเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าจากข้อมูลความเร็วลมที่วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD มีผลของพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จากบริษัทผู้ผลิต

Wind Speed (m/s)	Power output (watt)	Energy output (kWh/day)	Energy output (kWh/year)	South
0	0	0	0	
2	50	1.20	438.00	
2.5	160	3.84	1,401.60	
3	250	6.00	2,190.00	
3.02	253.6	6.09	2,221.5	WT 1 (SW)
3.08	264.4	6.35	2,317.75	WT 2 (SW)
3.5	340	8.160	2,978.40	
4	602	14.45	5,273.52	
4.5	852	20.45	7,463.52	
5	1325	31.80	11,607.00	
5.5	1602	38.45	14,033.52	
6	1860	44.64	16,293.60	
6.5	2300	55.20	20,148.00	
7	2620	62.88	22,951.20	
7.4	2926.4	70.23	25,635.26	WT 1 (NE)
7.5	3003	72.072	26,306.28	
8	3752	90.05	32,867.52	

ตารางที่ 4.4 พลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บผลิตได้จากบริษัทผู้ผลิต (ต่อ)

Wind Speed (m/s)	Power output (watt)	Energy output (kWh/day)	Energy output (kWh/year)	South
8.1	3,901.60	93.63	34,178.02	WT 2 (NE)
8.5	4500	108.00	39,420.00	
9	4800	115.20	42,048.00	
9.5	5000	120.00	43,800.00	
9.8	5000	120.00	43,800.00	WT 3 (SW,NE)
10	5000	120.00	43,800.00	

ตัวอย่าง การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วลม 10 m/s เมื่อพัดผ่านตำแหน่ง WT1 ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ(NE)

$$V_0 = 10 \text{ m/s}, V = 7.44 \text{ m/s}$$

$$P = 2926.4 \text{ watts} = 2.93 \text{ kW}$$

$$E = 2.93 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 70.23 \text{ kWh/day}$$

$$E = 70.23 \text{ kWh/day} * 365 \text{ day} * 0.5 = 12,817.63 \text{ kWh/year}$$

WT1 ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

$$V_0 = 10 \text{ m/s}, V = 3.02 \text{ m/s}$$

$$P = 253.6 \text{ watts} = 0.25 \text{ kW}$$

$$E = 0.25 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 6.09 \text{ kWh/day}$$

$$E = 6.09 \text{ kWh/day} * 365 \text{ day} * 0.5 = 1,111.425 \text{ kWh/year}$$

ดังนั้นจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บผลิตได้ต่อปีมีค่าเท่ากับ

$$E = 12,817.63 \text{ kWh/year} + 1,111.425 \text{ kWh/year}$$

$$E = 13,929.06 \text{ kWh/year}$$

ตำแหน่ง WT2 ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ(NE)

$$V_0 = 10 \text{ m/s}, V = 8.1 \text{ m/s}$$

$$P = 3,901.60 \text{ watts} = 3.9 \text{ kW}$$

$$E = 2.93 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 93.63 \text{ kWh/day}$$

$$E = 93.63 \text{ kWh/day} * 365 \text{ day} * 0.5 = 17,089.01 \text{ kWh/year}$$

WT1 ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

$$V_0 = 10 \text{ m/s}, V = 9.8 \text{ m/s}$$

$$P = 264.4 \text{ watts} = 0.264 \text{ kW}$$

$$E = 0.264 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 6.35 \text{ kWh/day}$$

$$E = 6.35 \text{ kWh/day} * 365 \text{ day} * 0.5 = 1,158.87 \text{ kWh/year}$$

ดังนั้นจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ต่อปีมีค่าเท่ากับ

$$E = 17,089.01 \text{ kWh/year} + 1,158.87 \text{ kWh/year}$$

$$E = 18,247.89 \text{ kWh/year}$$

ตำแหน่ง WT3 ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ(NE)

$$V_0 = 10 \text{ m/s}, V = 9.8 \text{ m/s}$$

$$P = 5,000 \text{ watts} = 5 \text{ kW}$$

$$E = 5 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 120 \text{ kWh/day}$$

$$E = 120 \text{ kWh/day} * 365 \text{ day} * 0.5 = 21,900 \text{ kWh/year}$$

WT3 ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

$$V_0 = 10 \text{ m/s}, V = 9.8 \text{ m/s}$$

$$P = 5,000 \text{ watts} = 5 \text{ kW}$$

$$E = 5 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 120 \text{ kWh/day}$$

$$E = 120 \text{ kWh/day} * 365 \text{ day} * 0.5 = 21,900 \text{ kWh/year}$$

ดังนั้นจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ต่อปีมีค่าเท่ากับ

$$E = 21,900 \text{ kWh/year} + 21,900 \text{ kWh/year}$$

$$E = 43,800 \text{ kWh/year}$$

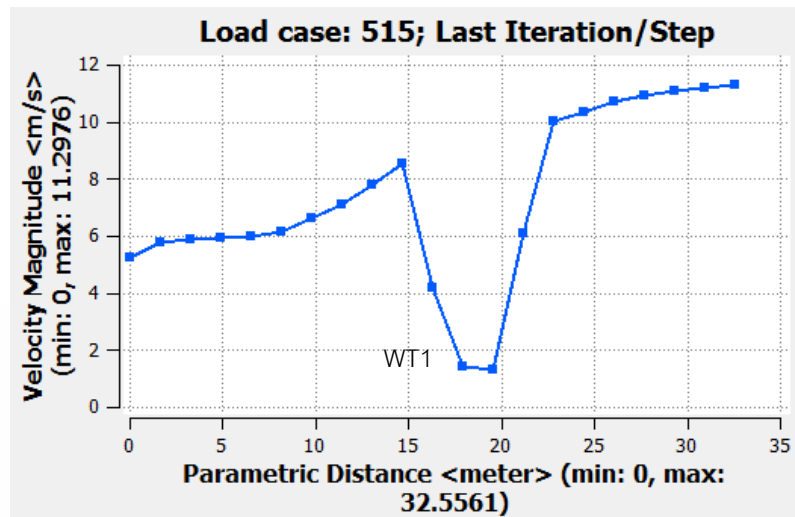
4.4 ผลความสูงของอาคารที่มีผลต่อกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของความเร็วลมด้วยโปรแกรม CFD ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ด้วยความเร็ว 10 m/s พบว่า

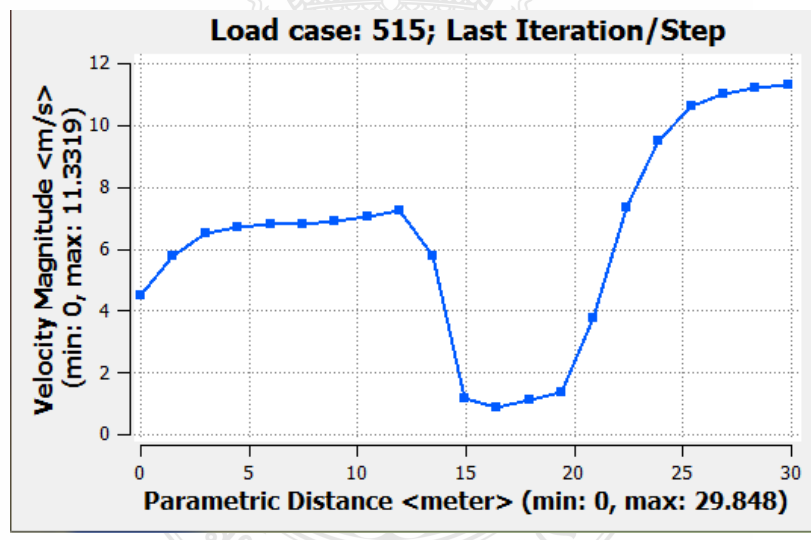
เมื่อลมเคลื่อนที่ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ที่ความเร็วลม 10 เมตร/วินาที ความเร็วลมที่ตำแหน่งกังหันลมตัวที่ 1 (WT1) ลดลง 25.62% กังหันลมตัวที่ 2 (WT2) ลดลง 18.35% และกังหันลมตัวที่ 3 (WT3) ลดลง 1.46% ดังแสดงในตารางที่ 4.5 มีผลมาจากความสูงของอาคารนิทรรศการ (C) สูง 9.25 เมตร ขวางการไหลของอากาศ ทำให้เกิดการปั่นป่วนมีผลกับความเร็วลม ทำให้เมื่อวัดความเร็วลมจากพื้นถึงหน้าตัดกังหันลม พบว่าความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปตามความสูงของเสากังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับระยะทางความสูงจากโคนเสากังหันลมตัวที่ 1

ตารางที่ 4.5 ความเร็วลมทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ(NE) เมื่อวิเคราะห์จากโปรแกรม CFD

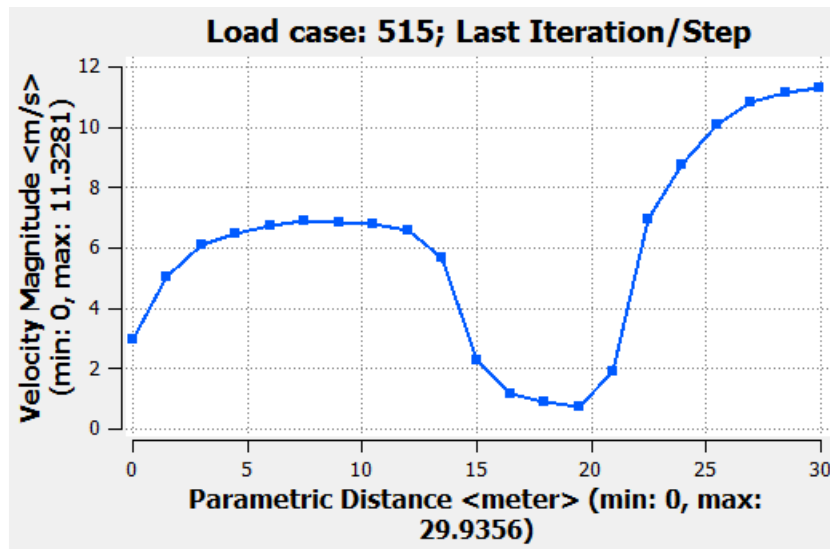
Point	ความเร็วลมที่ WT1 (m/s)	ความเร็วลมที่ WT2 (m/s)	ความเร็วลมที่ WT3 (m/s)
1	8.63	8.83	9.92
2	8.39	8.31	9.84
3	5.54	7.42	9.78
4	7.19	8.09	9.87
sum	29.75	32.66	39.41
ave	7.44	8.16	9.85
%de	25.62	18.35	1.47



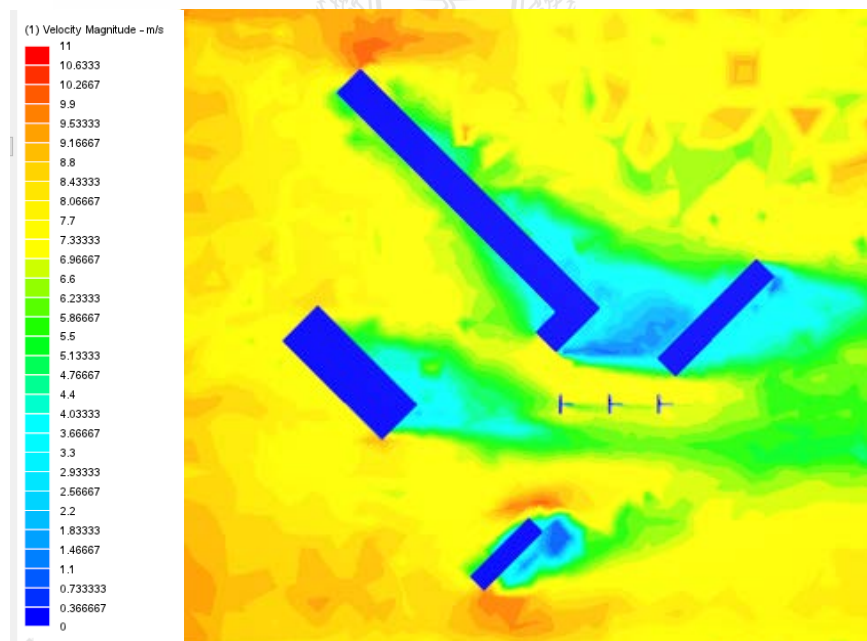
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงกับความเร็วลมที่ตำแหน่งกังหันลมตัวที่ 1 วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD



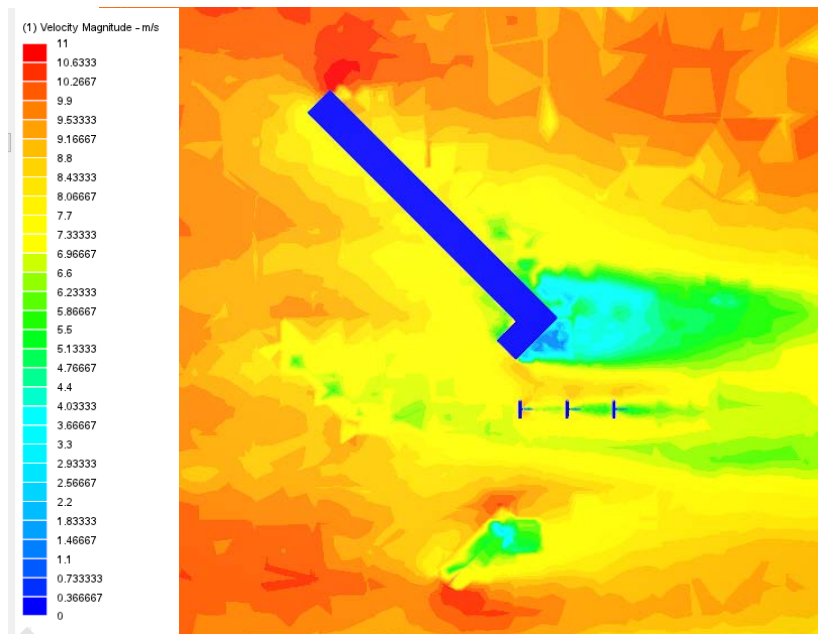
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงกับความเร็วลมที่ตำแหน่งกังหันลมตัวที่ 2 วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD



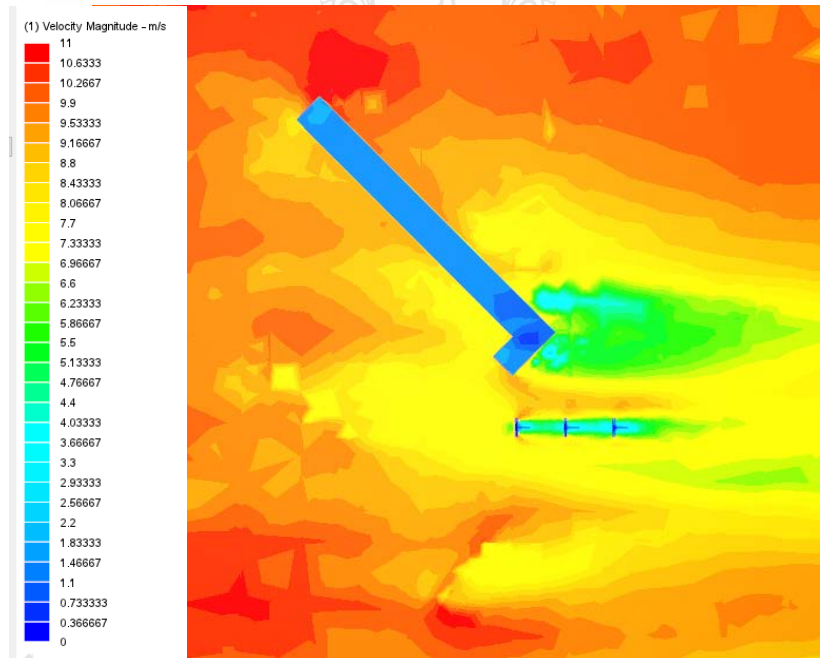
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงกับความเร็วลมที่ตำแหน่งกั้นลมตัวที่ 3 วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD



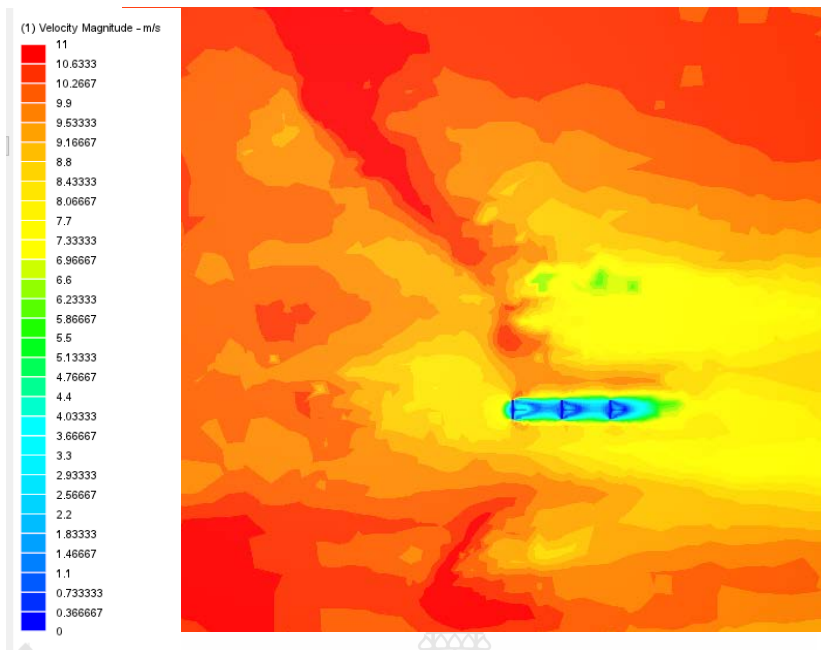
รูปที่ 4.5 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะความสูงเท่ากับ 9.5 เมตร ด้วยโปรแกรม CFD



รูปที่ 4.6 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะความสูงเท่ากับ 13.3 เมตร



รูปที่ 4.7 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะความสูงเท่ากับ 15 เมตร



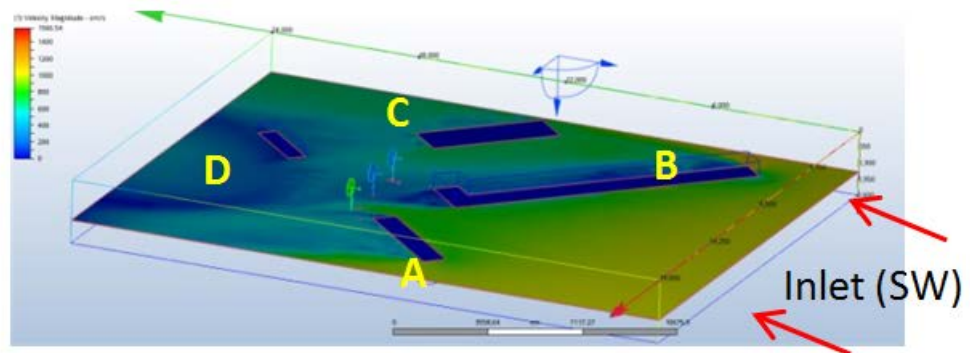
รูปที่ 4.8 วิเคราะห์ความเร็วลมที่ระยะความสูงเท่ากับ 18 เมตร

ตารางที่ 4.6 ความเร็วลมทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เมื่อวิเคราะห์จากโปรแกรม CFD

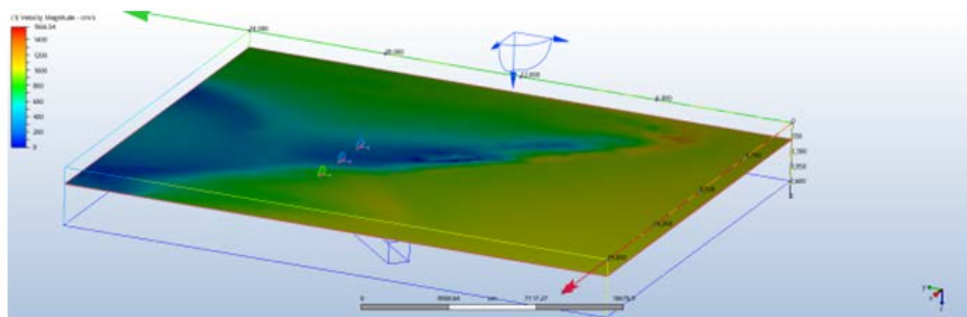
Point	ความเร็วลมที่ WT1 (m/s)	ความเร็วลมที่ WT2 (m/s)	ความเร็วลมที่ WT3 (m/s)
1	3.06	3.88	9.93
2	3.54	1.94	9.77
3	2.93	2.24	9.86
4	2.54	4.27	9.92
sum	12.08	12.33	39.49
ave	3.02	3.08	9.87
%de	69.7	69.17	1.27

จากตารางที่ 4.6 พบว่าความเร็วลมที่ตำแหน่ง WT1 ลดลง 69.79% , WT2 ลดลง 69.177%, WT3 ลดลง 1.27% มีผลมาจากความสูงของอาคารจัดเลี้ยงและอาคารที่พัก (A,B) ขวางการไหลของ

อากาศทำให้เกิดการปั่นป่วนลมหมุนวนบริเวณด้านหลังอาคาร กำลังลมจึงลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ที่ความสูง 9.25 เมตร เท่ากับความสูงอาคาร A,C ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้



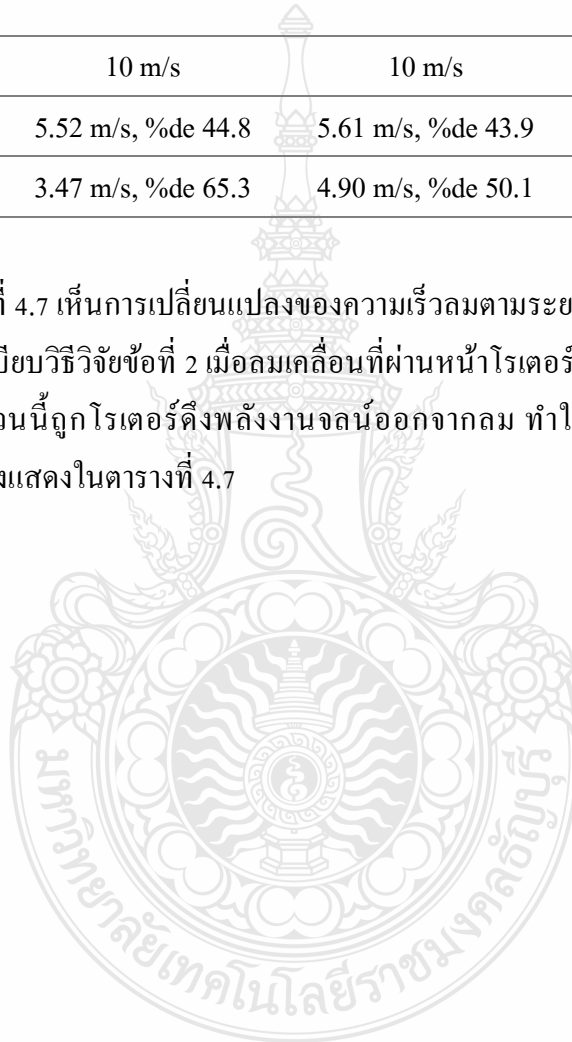
รูปที่ 4.10 ที่ความสูง 18 เมตร เท่ากับความสูง Wind Turbine ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้

4.5 วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเมื่อเปลี่ยนระยะการติดตั้งกังหันลมที่ระยะ 12,18 และ 24 เมตร

ตารางที่ 4.7 ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง

Distance	12 m.	18 m.	24 m.
Velocity			
WT1	10 m/s	10 m/s	10 m/s
WT2	5.52 m/s, %de 44.8	5.61 m/s, %de 43.9	5.96 m/s, %de 40.4
WT3	3.47 m/s, %de 65.3	4.90 m/s, %de 50.1	5.81 m/s, %de 41.9

จากตารางที่ 4.7 เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามระยะทางที่ติดตั้งกังหันลม และจากสมมติฐานในระเบียบวิธีวิจัยข้อที่ 2 เมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านหน้าโรเตอร์ในตำแหน่ง WT1 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ลมส่วนนี้ถูกโรเตอร์ดึงพลังงานจลน์ออกจากลม ทำให้ลมถูกหน่วงความเร็วลง ความเร็วลมจึงลดลงดังแสดงในตารางที่ 4.7



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไหลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านกลุ่มอาคารและหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ภายในศูนย์ฝึกบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง จากผลของการเพิ่มและลดขนาดของระยะห่างระหว่างเสากังหันลม ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

5.1.1 จากการวิเคราะห์การไหลของอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณอากาศพลศาสตร์ของไหล (CFD) วิเคราะห์ความเร็วลมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านอาคารด้วยความเร็วลม 10 m/s ในทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ พบว่าขนาดความสูงของอาคารทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณด้านเหนือลมและใต้ลม ความปั่นป่วนบริเวณด้านเหนือลมนี้อาจทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นที่ระยะความสูงหนึ่งและบริเวณด้านใต้ลมหรือหลังอาคารความเร็วลมลดลง ซึ่งจากการทดลองนี้อาคารนิทรรศการ (C) ขวางการไหลของอากาศในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ และอาคารที่พัก (A) ขวางการไหลของอากาศในทิศตะวันตกเฉียงใต้ เมื่อวัดความเร็วลมที่บริเวณหน้าตัดโรเตอร์ของกังหันลมพบว่า ที่ตำแหน่งกังหันลมตัวที่ 1 ติดตั้งห่างจากอาคารนิทรรศการเท่ากับ 60 เมตร ในหนึ่งปีความเร็วลมลดลงเฉลี่ย 47.71 % และสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมตัวที่ 1 ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 13,929.06 kWh/year ลดลง 67.6 % ที่กังหันลมตัวที่ 2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 18,247.89 kWh/year ลดลง 57.56 % และที่กังหันลมตัวที่ 3 ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 43,800 kWh/year

5.1.2 จากผลของการเพิ่มระยะห่าง ระหว่างเสากังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่ระยะ 12, 18 และ 24 เมตร โดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาช่วยในการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านหน้าโรเตอร์ของกังหันลมตัวที่ 1 ลมส่วนนี้ถูกโรเตอร์ดึงพลังงานจลน์ออกจากลม ทำให้ลมถูกหน่วงความเร็วลง ความเร็วลมที่ตำแหน่งกังหันลมตัวที่ 2 ที่ระยะ 12 เมตร ความเร็วลมลดลง 44.8% ที่ระยะ 18 m/s ความเร็วลมลดลง 43.9 % และที่ระยะ 24 เมตร ความเร็วลมลดลง 40.4 % ที่ตำแหน่งกังหันลมตัวที่ 3 ที่ระยะ 12 เมตร ความเร็วลมลดลง 65.3 % ที่ระยะ 18 m/s ความเร็วลมลดลง 50.1 % และที่ระยะ 24 เมตร ความเร็วลมลดลง 41.9 % ผลจากการทดลองเห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมแปรผันตามกับระยะห่างที่ติดตั้งกังหันลม แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มหรือ

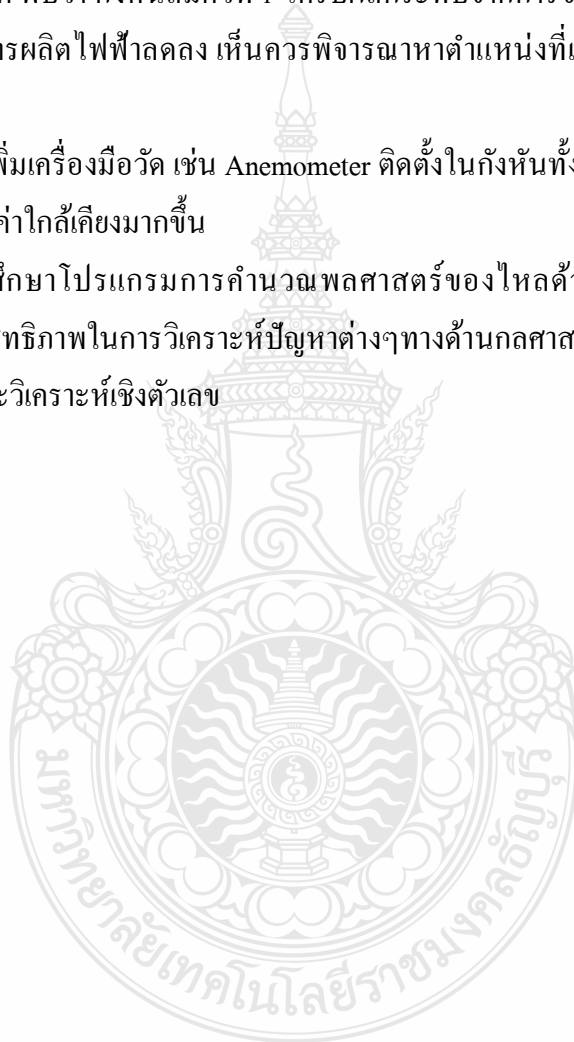
ลระยะเวลาห่างระหว่างการติดตั้งเสาของกังหันลมมีผลต่อความเร็วลมและอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการผลการศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศที่มีผลต่อกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ พบว่า กังหันลมตัวที่ 1 ได้รับผลกระทบจากการขวางการไหลมากที่สุดทำให้ทำประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าลดลง เห็นควรพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการดำเนินการติดตั้งกังลมต่อไป

5.2.2 ควรเพิ่มเครื่องมือวัด เช่น Anemometer ติดตั้งในกังหันทั้ง 3 ตัว เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และมีค่าใกล้เคียงมากขึ้น

5.2.3 ควรศึกษาโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD V.7) เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆทางด้านกลศาสตร์ของไหล นำมาใช้ในการออกแบบกังหันลมและวิเคราะห์เชิงตัวเลข



บรรณานุกรม

- [1] พินิจ สังข์ทอง, “การวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 เมกะวัตต์ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [2] ลมบกมทะเล (Online), Available: http://filmsrrt2.blogspot.com/2014/12/blog-post_13.html, (4 April 2017).
- [3] ลมภูเขา (Online), Available: <http://www.thaigoodview.com/library/contest2552/type1/science03/16/contents/p03.html>, (4 April 2017).
- [4] ชาคริต จินลอย, “การศึกษาผลกระทบของรูปร่างปลายใบกังหันลมต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2557.
- [5] วิรัช ไรยนรินทร์, มปป., “ต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ.” เอกสารประกอบโครงการศึกษาวิจัย พัฒนา.
- [6] นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์, “เทคโนโลยีพลังงานลม,” Naresuan University Journal, 2004, 12(2), PP57-73.
- [7] พิรุฬห์ วันดี, “การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกลุ่มอาคาร.” โครงการศึกษาปริญญาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556.
- [8] Yu-Ting Wu and Chang-Hung Chen. “A Numerical Study of the Effects of Wind Direction on Turbine Wakes and Power Losses in a Large Wind Farm.” Wind Engineering and Renewable Energy Laboratory (WIRE) Switzerland, 2013.
- [9] Nak Joon Choi, “CFD Study on Aerodynamic Power Output Changes with Inter-Turbine Spacing Variation for a 6 MW Offshore Wind Farm.” School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2014.
- [10] กังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ (Online), Available: <http://www.ft-energy.co.th>, (4 April 2017).
- [11] Eggleston, D. M. & Stoddard, F. S. (1987) Wind turbine engineering design. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., pp. 26-30.

บรรณานุกรม(ต่อ)

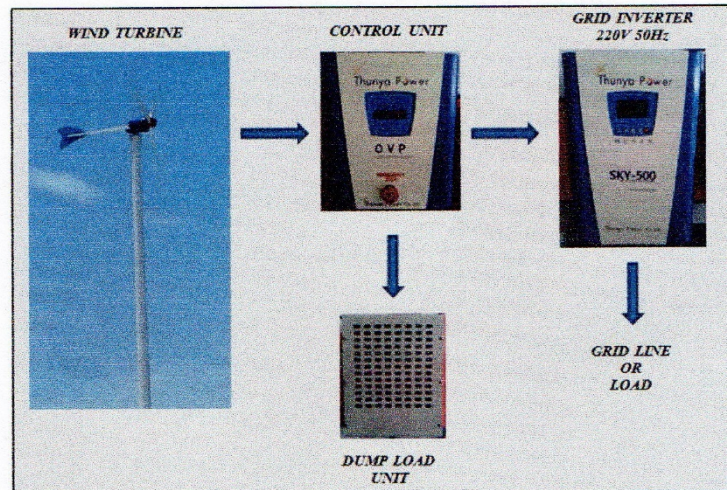
- [12] Potter, M. C. & Wiggert, D. C. (1997) Mechanics of fluids. 2nd edn. Prentice-Hall International, Inc., pp. 121-125.
- [13] Wilson, R. E., Lissaman, P. B. S. & Walker, S. N. (1976) Aerodynamic performance of wind turbines. p. 8-18.
- [14] กราฟพลังงาน(Online), Available: <http://www.ft-energy.co.th>, (4 April 2017).
- [15] ศูนย์ฝึกศึกษาบุคลากรปิโตรเลียมและพลังงานทางทหาร จ.ระยอง(Online), Available:<https://www.google.co.th/maps/place>, (4 April 2017).



ภาคผนวก ก
คู่มือการใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์



Thunya-5000 Wind Turbine



Technical data of Thunya-5000 Wind Turbine

Rotor diameter	6.5 m
Rated power	5000 Watt @ 9.5 m/sec
Cut - in	2.5 m/sec
Arrangement	Upwind machine
Rotor speed	200 rpm
Yaw mechanism	Active (Azimuth angle)
Breaking system 1	Auto Furling
Breaking system 2	Manual break and short circuit

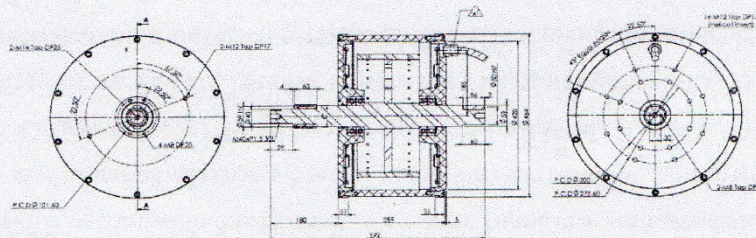
<u>Energy yield</u>	3.5 m/sec 5.40 kWh/day
	4.0 m/sec 8.06 kWh/day
	4.5 m/sec 11.50 kWh/day

PM GENERATOR SPECIFICATION

Model : SWEG6K-AB240-I

	Symbol	units	
Output power	P_o	kW	6
Rated speed	ω	rpm	240
Output Voltage	E	V	220(Line-Line)
Max. Efficiency	η	%	94(Max)
Rotor			Permanent magnet
Number of Poles	-	-	30
Speed Constant	K_E	Vdc/rpm	1.37
Resistance at 20 °C(Line-Line)	R_T	Ω	1.38
Inductance (Line-Line)	L	mH	4.5
Rotor Inertia	J	Kg-m ²	0.85
Maximum Temperature	C_{Max}	°C	120
Winding			Wye
Starting Torque		Nm	< 0.6
Shaft Play-Axial		mm	< 0.2
Gen. Weight	W_g	Kg	125

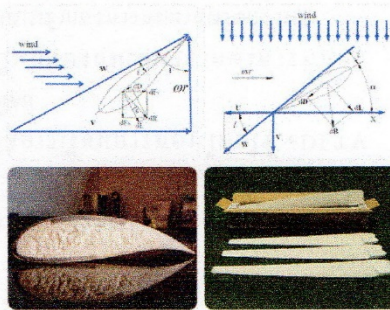
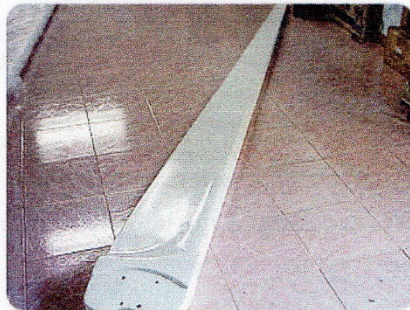
[Table 2-2]



[FIG. 2-3]

BLADE SPECIFICATION

Low Sound Technology (Super Light and Strong)



Specifications

Rated power: 5 kW @ 9.5m/s

- 100 RPM at 3 m/s
- Sound level at maximum RPM less than 30 DB @ 30 Meter
- Bending test maximum full load 70 kg.m at Max. Deflection ~ 0.067 m.
- Double layer Poly-Urethane for UV protection and hard weather condition process
- Blade Length 3.16 M @ 6 Degree twist angle for optimum Tip Speed Ratio of 9.5
- Good for Marine application
- Suitable for wind average of 5 m/s
- Maximum load of 8 kN.m
- Weight per blade 11.0 kg +- 0.05 percent
- Material of Fiber Glass Reinforced with Epoxy

SKY 500 Grid Connect Inverter



I Mechanical Specification

Structure	Cooling	Natural Air-Cooled
	Protect Level	IP 54
	Noise	Below 55dB
	Size	352 × 550 × 171 [mm]
	Weight	31kg
Operating Environment	Operating Temperature	-40 °C ~ 80 °C
	Storage Temperature	-40 °C ~ 80 °C
	Operating Humidity	Below RH 90% (No condensation)
	Storage Humidity	Below RH 90% (No condensation)
	Environment	No Flammable, corrosive gas
	Altitude	Below Altitude 1,000 m
	Vibration	Below 0.5 G (4.9 m/s ²)

2 Electrical Specification

Input	Maximum Voltage	DC 600 V
	Maximum Current	16 Adc
	Rated Voltage	DC 380 V (200 ~ 500Vdc)
	Source Type	WIND
Output	Rated Output	5.0 kW
	Rated Voltage	Grid voltage, 220 Vac (+10/-12%)
	Frequency	Grid Frequency (50Hz \pm 0.1 Hz)
	Phase Number	Single Phase 2 Wire
	Power Factor	Over 0.95
	THD	Under total 5%, Under each disparity 3%
	Control Method	PWM, MPPT
	Standalone Run	Within 0.5 Second
	Overload	110% of rated output
Efficiency	Over 95%	
Protection	Inverter	Input Over voltage, Input Over Currency, Output, Overload, Overheating, Leakage Current
	Grid	Over voltage, Low voltage, Over Frequency, Low Frequency, Prevention Standalone Run

TOWER CALCULATION AND SPECIFICATION

(41.67 m/sec) level Not more than 18 m.

Types : Tapered Steel Tower
 Material : Rolled steel according to JIS G 3101 SS.400 standard
 or JIS G 3106 SM 41 A standard
 Welding : BS.5135 : 1974 standard
 Corrosive Protection : Hot dip galvanized according to BS. 729 : 1971 standard

PHYSICAL DATA

General Height : 18 m.
 Thickness : 6 mm + 0.2 mm.
 No. of longitudinal lapped pole : 2 Set
 Length of each lapped pole : Bottom pole : 10.75 m.
 Top pole : 8 m.
 OD of bottom pole : 600 mm.
 OD of upper end pole : 350 mm.

PHYSICAL DATA

No of slip joint : 1
 Length of slip joint : 750 mm.
 OD of base plate : 850 mm.
 Base plate thickness : 30 mm.
 Distance between holes PCD. : 720 mm.
 Diameter of hole : 31 mm.
 No of bolt : 12
 Diameter of bolt : 25 mm.

TURBINE PROPERTY

Width of fan : 0.30 m.
 Diameter of fan : 6.50 m.
 Weight of Turbine : 250 kg.

WEIGHTS

Pole	:	1265 kg.
Turbine	:	250 kg.
Base plate	:	63 kg.
Gussetts	:	13 kg.
Bolt	:	65 kg.
Live Load	:	500 kg.
TOTAL P	:	2156 kg.

DESIGN CRITERIA

Shape coefficient (Cs)	:	1.3
The diameter of fan	:	6.50 m.
The width of fan	:	0.30 m.
The basic wind speed of pole (V) (American Society of Civil Engineers)	Pwind	150 Km./hr. (0-18 m.) 0.00473 Cs x V ² Vmax(pole) = 41.67 m./sec 138.35 kg./m. ²
The basic wind speed of Turbine	F	$\frac{1}{2} \rho AV^2$ Vmax(turbine) = 12 m./sec 2.93 KN
	Pturbine	298.19 kg.

FOOTING (CONCRETE AND STEEL BAR)

Fc'	=	210 Ksc (Cylinder 28 days)
Fc	=	94.5 Ksc.
n	=	9.00
fs	=	1500 Ksc. - Deformed bar grade SD 30
k	=	0.362
j	=	0.879
R	=	15.03 kg./cm. ²

BASE PLATE DESIGN

OD of plate	=	85 cm.
ID of plate	=	60 cm.
Area of plate	=	$\frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2) = 2845.63 \text{ cm.}$
I	=	$\frac{OD^4 - ID^4}{20} = 1,962,031 \text{ cm}^4$
σ	=	$\frac{P + MY}{A \cdot I}$
	=	35.45 kg./cm ²
Bearing stress concrete	=	0.45 Fc' = 94.50 Kg./cm ² > σ OK

PLATE THICKNESS

$$L = 10.5 \text{ cm}$$

$$M = \frac{1}{2} \rho \times L^2 = 1953.92 \text{ kg-cm}$$

$$Z = \frac{M}{0.6 \times 2500} = 1.30 \text{ cm}^2$$

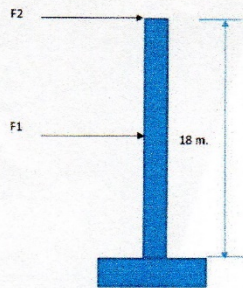
$$Z = \frac{L^2}{6}$$

$$t = \sqrt{Z \times 6} = 2.80 \text{ cm}$$

Use plate thickness = 3.00 cm > t OK

**Freestanding tubular Steel Tower 18 m
CALCULATION TABLE**

LEVEL HIGH (m.)	DIAMETER (mm.)	CROSS SECTION (cm ²)	PROJECTED AREA m ²	WIND PRESSURE (kg/m ²)	BENDING MOMENT (kg-m)	AXIAL FORCE (kg)	I = D ⁴ / 64 (cm ⁴)	σ = P + MY / A I (kg./cm ²)
0	600	111.97	8.55	138.35	16013.68	2156	50305.43	974.24
6	517	96.32	5.202	138.35	7896.56	1497.33	32028.29	652.25
12	433	80.49	2.349	138.35	2764.12	718.67	18688.77	329.14
18	350	64.84	-	-	969.12	250	9772.79	177.40
TURBINE	-	-	-	-	298.19	-	-	-



$$F1 = \frac{1}{2} (\text{OD of bottom} + \text{OD of upper}) \times \text{The basic wind speed of pole} \times \text{High}$$

$$= 1182.91 \text{ kg}$$

$$F2 = \frac{1}{2} \rho A V^2 = 298.19 \text{ kg}$$

$$V = F1 + F2 = 1481.11 \text{ kg}$$

$$M \text{ at mat base} = (F1 \times H/2) + (F2 \times H) = 15013.68 \text{ kg-m}$$

$$\sigma \text{ at occur} = \frac{P + MY}{A I} = 974.24 \text{ kg./cm}^2 < 0.6F_y \text{ OK}$$

OVER TURNING

Dimension of Footing
 Length = 3.25 m.
 Width = 3.25 m.
 Depth = 1.00 m.
 Weigh = 25350.00 kg.

M (Resistant) = 41193.75 kg.-m.
 Mu = 16013.68 kg.-m.
 F.S. = M(Resistant)/Mu = 2.57 > 2.0 F.S. OK.

DEFLECTION CALCULATION

Δ_{L1} = $\frac{P_{wind} \times L^4}{8EI}$
 = 0.17 cm.
 Δ_{L2} = $\frac{P_{turbine} \times L^3}{3EI}$
 = 5.49 cm.
 Δ_{total} = 5.66 cm. < L/300 (Deflection of Cantilever Beams) OK

BOLT DESIGN

SHEAR FORCE OF BOLT

Distance between holes PCD. = 720 mm.
 No of bolt = 12
 Diameter of bolt (d) = 25 mm.
 Base plate thickness (t) = 30 mm.
 หน่วยแรงที่จุดคานของ Bolt (Fy) = 2500 kg./cm²
 หน่วยแรงดึงประลัยค่าสุดของ Bolt (Fu) = 4050 kg./cm²
 พื้นที่หน้าตัดส่วนหัวของ Bolt (Ae) = 4.91 cm²

V_{ax} of bolt = $0.4F_y$
 = 1000.00 kg./cm²
 V of wind = 1481.11 kg.

V_{bolt} = $\frac{0.75 \times d \times V_{ax} \times \text{No. of bolt}}{4}$
 = 44178.65 kg. > V of wind OK

Bond of bolt = $\frac{1 \times d \times \text{No. of bolt} \times L \times 1.145 \times v \times 210}{2d}$

M (P x PCD/2) = $\frac{1 \times d \times \text{No. of bolt} \times L \times 1.145 \times v \times 211}{2d}$

PCD = 21465.06 = 313.51 L
 L = 68.47 cm
 Use bolt M25 Embedded length 70 cm. > L OK

Compression of bolt = $0.75(2.4dF_y)$
 = 33750.00 kg./ตัว > Total P OK

Tension of bolt = $0.5FuAe$
 = 9540.20 kg./ตัว
 = Tension of bolt x PCD/2
 = 35784.70 kg.-m. > M at mat base OK

WELD DESIGN

Used E70 Electrode
 กำลังรับแรงดึงของลวดเชื่อม (Fexx) = 4900 kg./cm²
 ขนาดของรอยเชื่อม (Size) = 8 mm.
 ความยาวของรอยเชื่อม (L) = (t) x PCD/2
 = 113.10 cm.
 กำลังรับแรงของรอยเชื่อม = $0.3 \times F_{exx} \times 0.707 \times \text{size} \times L$
 = 94032.74 kg. > V OK



ความร่วมมุงสูง(น้อย)

รายวัน

ที่	สถานี	สถานี	วันที่																															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	478201-22004 จ.ระยอง	ม.ค.-15	14	8	6	9	12	9	8	12	8	6	13	8	8	7	8	10	8	5	7	4	6	7	7	4	10	15	10	5	7	10	8	
2	478201-22004 จ.ระยอง	ก.พ.-15	12	7	12	17	7	20	14	15	11	12	10	8	19	15	12	9	13	20	18	11	14	13	12	10	14	8	8	-	-	-	13	
3	478201-22004 จ.ระยอง	มี.ค.-15	10	15	10	10	6	17	10	12	10	14	8	10	12	14	15	10	14	10	8	7	8	9	13	12	7	9	6	6	7	9	10	
4	478201-22004 จ.ระยอง	เม.ย.-15	8	10	9	10	10	7	8	9	8	12	10	7	9	6	9	12	14	10	10	11	9	8	15	6	15	8	8	10	10	-	10	
5	478201-22004 จ.ระยอง	พ.ค.-15	8	15	14	19	19	8	8	22	20	8	8	6	15	16	7	8	8	14	12	31	18	18	14	15	17	18	13	12	15	8	14	
6	478201-22004 จ.ระยอง	มิ.ย.-15	8	6	10	6	6	12	24	12	10	10	6	10	10	7	3	15	24	7	15	12	14	25	14	17	10	20	11	12	10	-	12	
7	478201-22004 จ.ระยอง	ก.ค.-15	15	14	14	12	15	14	15	12	12	15	15	12	12	13	16	20	17	14	15	18	16	8	5	6	8	12	8	5	7	17	13	
8	478201-22004 จ.ระยอง	ต.ค.-15	6	16	10	12	15	12	16	15	14	10	10	7	13	10	8	12	13	12	18	20	16	13	-	14	16	14	8	13	13	14	12	13
9	478201-22004 จ.ระยอง	ก.ย.-15	13	12	14	8	7	8	12	10	10	17	12	10	14	14	12	12	20	20	8	8	8	14	15	12	13	12	10	12	12	7	-	12
10	478201-22004 จ.ระยอง	ค.ค.-15	4	8	12	18	15	7	8	9	5	14	8	6	6	7	8	8	10	6	6	8	7	8	7	13	6	8	12	6	7	8	10	9
11	478201-22004 จ.ระยอง	พ.ย.-15	7	14	10	8	8	12	8	15	8	7	11	7	8	8	7	9	7	16	11	10	10	7	8	7	18	8	8	8	7	-	9	
12	478201-22004 จ.ระยอง	ธ.ค.-15	13	8	8	11	10	9	7	8	9	8	8	6	8	8	7	18	7	8	13	7	6	8	7	7	8	10	8	10	15	22	9	
13	478201-22004 จ.ระยอง	ม.ค.-16	10	10	8	8	8	8	7	7	14	11	8	7	7	14	10	12	10	7	11	14	9	8	7	13	7	12	8	8	8	15	9	
14	478201-22004 จ.ระยอง	ก.พ.-16	9	7	8	6	7	14	13	9	7	6	7	6	8	8	14	9	10	9	9	11	10	8	10	21	13	10	10	8	-	-	9	
15	478201-22004 จ.ระยอง	มี.ค.-16	8	8	9	8	9	9	11	9	9	10	10	13	8	6	11	12	7	8	7	10	9	12	8	8	12	9	12	10	11	10	12	10
16	478201-22004 จ.ระยอง	เม.ย.-16	10	10	9	10	8	9	10	8	9	9	9	9	10	9	12	10	10	9	11	12	11	10	11	10	8	10	9	9	12	-	10	
17	478201-22004 จ.ระยอง	พ.ค.-16	9	9	8	11	9	10	14	10	9	11	12	11	8	9	13	12	4	10	6	14	15	14	15	16	15	17	13	10	10	11	11	
18	478201-22004 จ.ระยอง	มิ.ย.-16	12	8	17	9	18	11	14	10	12	25	10	14	10	21	14	35	11	6	7	22	11	15	16	20	10	21	12	11	19	14	-	15
19	478201-22004 จ.ระยอง	ก.ค.-16	16	8	7	13	10	26	12	26	14	14	14	28	11	8	10	12	9	10	12	18	6	6	11	9	9	10	12	13	13	12	10	13
20	478201-22004 จ.ระยอง	ต.ค.-16	11	13	22	13	6	11	21	13	15	15	13	14	15	15	14	14	14	17	14	14	14	14	6	11	12	11	10	13	13	16	14	
21	478201-22004 จ.ระยอง	ก.ย.-16	11	12	12	10	12	13	14	16	10	14	12	10	14	10	14	12	8	8	8	7	12	12	12	7	6	6	12	10	10	-	11	
22	478201-22004 จ.ระยอง	ค.ค.-16	6	12	8	8	7	11	7	8	17	8	12	10	7	10	7	6	6	8	10	12	11	12	11	10	8	-	-	-	-	-	9	

หมายเหตุสรุป : รหัสสถานี ที่เลือก (478201) ปี : (2016,2015) เดือน : (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12)

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง

เดือน ตุลาคม 2558

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/10/2015	0	0	0	0	0	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/10/2015	5	0	0	3	0	5	4	8	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/10/2015	5	7	0	0	3	0	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/10/2015	0	8	8	5	4	10	10	0	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/10/2015	8	2	5	3	4	0	3	4	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/10/2015	3	0	0	0	4	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/10/2015	0	0	0	3	5	8	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/10/2015	0	0	0	3	0	0	0	0	0
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/10/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	-
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/10/2015	0	0	0	0	8	8	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/10/2015	0	0	0	0	4	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/10/2015	0	0	0	3	3	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/10/2015	0	0	2	0	3	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/10/2015	0	0	0	5	3	3	3	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/10/2015	0	0	0	4	4	4	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/10/2015	0	0	3	0	5	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/10/2015	0	0	0	2	4	5	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/10/2015	0	0	0	3	4	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/10/2015	0	0	0	4	3	3	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/10/2015	0	0	0	0	2	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/10/2015	0	0	3	0	4	6	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/10/2015	0	0	0	3	5	4	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/10/2015	0	0	0	3	4	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/10/2015	0	0	0	7	8	3	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/10/2015	3	0	0	0	3	2	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/10/2015	0	0	0	3	3	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/10/2015	0	0	3	3	0	0	0	3	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/10/2015	0	0	0	0	4	2	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/10/2015	0	0	0	2	4	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/10/2015	0	0	0	0	6	5	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	31/10/2015	4	0	0	6	8	4	0	0	3
ความเร็วลมเฉลี่ย										1.7

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง
เดือน พฤษภาคม 2558

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/11/2015	0	0	0	3	4	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/11/2015	0	0	4	5	3	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/11/2015	0	0	0	0	4	3	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/11/2015	0	0	5	6	5	4	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/11/2015	0	0	2	0	4	0	0	2	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/11/2015	0	0	0	0	4	0	8	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/11/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	-
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/11/2015	0	0	0	2	6	6	0	4	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/11/2015	3	0	0	2	5	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/11/2015	0	0	0	2	3	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/11/2015	0	0	0	3	4	6	5	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/11/2015	0	0	0	2	6	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/11/2015	0	0	0	0	2	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/11/2015	0	0	0	2	5	6	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/11/2015	0	0	0	5	0	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/11/2015	0	0	0	0	4	5	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/11/2015	0	0	0	3	4	6	3	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/11/2015	0	0	0	0	5	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/11/2015	0	0	0	5	3	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/11/2015	0	3	3	3	4	4	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/11/2015	0	0	0	5	4	3	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/11/2015	0	0	0	4	5	4	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/11/2015	0	0	0	5	4	3	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/11/2015	0	0	0	3	4	3	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/11/2015	0	0	0	5	5	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/11/2015	0	3	2	6	3	6	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/11/2015	0	4	0	0	5	5	0	5	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/11/2015	0	0	4	5	4	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/11/2015	0	0	0	3	4	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/11/2015	0	0	0	6	5	4	0	0	2
ความเร็วลมเฉลี่ย										1.70

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง

เดือน ธันวาคม 2558

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/12/2015	0	3	0	0	4	2	5	3	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/12/2015	8	0	0	0	0	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/12/2015	0	0	0	0	4	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/12/2015	0	0	0	5	4	3	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/12/2015	2	0	0	0	7	0	0	4	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/12/2015	0	0	3	5	4	4	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/12/2015	0	3	0	3	5	5	3	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/12/2015	3	0	0	3	3	5	0	2	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/12/2015	3	0	0	2	4	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/12/2015	0	0	0	3	5	6	3	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/12/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	-
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/12/2015	0	0	0	0	4	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/12/2015	0	0	0	0	3	7	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/12/2015	0	0	0	0	5	5	5	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/12/2015	0	0	0	0	3	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/12/2015	0	0	2	3	4	3	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/12/2015	0	0	0	6	5	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/12/2015	5	0	0	4	6	5	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/12/2015	0	0	3	5	4	0	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/12/2015	3	0	4	5	5	0	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/12/2015	0	2	2	0	5	5	0	2	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/12/2015	2	0	0	5	4	4	0	3	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/12/2015	0	0	0	5	4	4	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/12/2015	0	0	0	4	4	5	5	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/12/2015	0	0	0	5	4	5	5	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/12/2015	0	0	0	0	3	2	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/12/2015	2	0	0	0	6	5	0	3	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/12/2015	0	0	0	10	8	5	0	2	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/12/2015	0	0	0	6	0	3	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/12/2015	0	0	0	8	8	5	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	31/12/2015	0	0	0	14	5	10	0	0	4
ความเร็วลมเฉลี่ย										1.93

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง

เดือน มกราคม 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/1/2016	5	3	0	5	8	5	4	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/1/2016	0	0	3	4	5	3	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/1/2016	3	0	0	0	5	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/1/2016	0	3	0	5	4	7	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/1/2016	0	0	0	0	3	3	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/1/2016	0	0	0	0	4	2	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/1/2016	0	0	0	2	5	6	3	3	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/1/2016	0	0	0	5	4	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/1/2016	0	0	5	5	4	4	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/1/2016	5	8	10	6	5	8	6	3	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/1/2016	8	4	0	3	5	5	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/1/2016	0	0	0	2	5	6	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/1/2016	0	0	0	0	4	0	6	4	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/1/2016	0	0	0	3	8	6	3	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/1/2016	0	5	0	0	0	6	0	5	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/1/2016	9	6	0	4	4	5	3	8	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/1/2016	4	2	0	0	0	2	2	4	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/1/2016	0	4	5	0	3	5	4	4	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/1/2016	4	0	0	3	5	9	11	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/1/2016	6	5	0	4	4	4	0	3	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/1/2016	5	0	0	2	5	5	6	6	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/1/2016	8	0	0	2	3	3	6	3	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/1/2016	0	0	0	0	6	5	5	5	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/1/2016	0	0	0	0	2	4	5	6	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/1/2016	5	4	3	5	5	6	3	4	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/1/2016	5	7	5	3	3	7	7	7	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/1/2016	8	5	5	4	3	2	0	2	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/1/2016	8	5	6	4	4	3	0	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/1/2016	0	0	0	2	4	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/1/2016	0	0	0	2	3	0	3	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	31/1/2016	3	0	0	0	3	3	0	0	1
ความเร็วลมเฉลี่ย										2.81

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง
เดือน กุมภาพันธ์ 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/2/2016	0	0	0	4	4	5	2	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/2/2016	0	0	2	3	3	3	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/2/2016	0	0	0	3	5	4	4	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/2/2016	0	2	0	0	4	4	5	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/2/2016	0	0	2	0	4	5	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/2/2016	0	0	0	7	10	8	0	5	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/2/2016	10	12	12	13	6	12	5	6	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/2/2016	4	5	0	0	4	4	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/2/2016	0	0	0	0	4	-	0	2	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/2/2016	0	2	0	0	4	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/2/2016	0	0	0	0	4	6	6	4	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/2/2016	0	0	0	4	3	5	0	3	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/2/2016	0	0	0	2	6	6	0	3	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/2/2016	0	4	0	3	5	4	4	4	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/2/2016	0	0	0	4	4	3	5	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/2/2016	0	0	0	0	4	0	6	2	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/2/2016	2	0	0	4	3	6	5	4	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/2/2016	3	0	0	0	5	6	4	3	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/2/2016	0	0	0	3	5	4	4	5	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/2/2016	8	3	0	3	5	6	4	6	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/2/2016	0	0	0	0	7	5	4	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/2/2016	6	4	4	6	5	10	6	5	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/2/2016	5	5	3	0	3	6	5	5	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/2/2016	5	2	0	0	3	7	2	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/2/2016	4	0	10	12	14	10	0	0	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/2/2016	0	4	2	10	6	8	6	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/2/2016	7	5	0	0	5	7	3	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/2/2016	0	0	0	3	2	8	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/2/2016	0	0	0	3	0	2	0	0	1
ความเร็วลมเฉลี่ย										2.90

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง

เดือน มีนาคม 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ									เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200		
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/3/2016	4	0	0	3	5	3	3	0	2	
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/3/2016	0	0	0	5	4	8	5	0	3	
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/3/2016	0	0	0	0	5	5	5	4	2	
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/3/2016	4	0	0	3	6	4	0	5	3	
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/3/2016	0	6	6	4	5	6	8	6	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/3/2016	5	6	0	2	4	7	6	6	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/3/2016	3	8	3	3	3	8	3	4	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/3/2016	6	8	8	5	8	6	4	4	6	
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/3/2016	4	4	3	3	7	4	2	3	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/3/2016	6	0	0	3	4	3	3	0	2	
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/3/2016	3	4	2	2	5	5	5	10	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/3/2016	8	5	9	6	8	8	10	10	8	
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/3/2016	5	5	0	3	6	3	0	0	3	
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/3/2016	4	2	2	2	4	6	4	4	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/3/2016	4	4	4	5	6	3	4	7	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/3/2016	8	0	5	5	5	4	3	3	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/3/2016	0	2	0	5	5	4	0	5	3	
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/3/2016	4	6	3	4	4	7	5	3	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/3/2016	4	0	3	3	4	5	3	0	3	
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/3/2016	4	4	4	5	5	4	4	6	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/3/2016	8	4	4	6	5	5	4	4	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/3/2016	5	5	5	4	5	5	6	4	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/3/2016	5	4	5	4	6	5	0	0	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/3/2016	4	3	0	2	5	3	4	7	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/3/2016	3	0	6	7	8	10	4	5	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/3/2016	5	0	0	2	6	6	6	4	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/3/2016	8	6	3	4	7	8	3	5	6	
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/3/2016	0	4	2	4	7	5	5	3	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/3/2016	6	0	2	0	3	6	6	5	4	
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/3/2016	5	3	3	6	7	8	7	2	5	
478201-ระยอง จ.ระยอง	31/3/2016	4	3	3	0	8	7	6	7	5	
ความเร็วลมเฉลี่ย										4.26	

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง
เดือน เมษายน 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ							เฉลี่ย	
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900		2200
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/4/2016	8	6	4	4	5	8	8	4	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/4/2016	4	6	0	4	8	6	2	4	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/4/2016	6	2	2	2	6	7	4	4	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/4/2016	4	9	2	5	8	6	5	6	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/4/2016	2	6	4	5	6	4	3	6	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/4/2016	3	4	3	5	4	3	2	4	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/4/2016	8	7	5	5	5	5	4	3	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/4/2016	0	2	4	5	5	5	4	4	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/4/2016	3	5	8	3	4	4	5	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/4/2016	7	5	6	4	4	5	2	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/4/2016	4	6	3	4	7	6	6	7	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/4/2016	8	5	2	4	4	8	4	6	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/4/2016	5	4	3	6	8	8	7	7	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/4/2016	8	5	0	3	5	6	6	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/4/2016	4	3	4	6	8	5	5	10	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/4/2016	7	5	6	8	5	6	5	3	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/4/2016	5	5	8	8	5	3	5	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/4/2016	4	6	6	4	7	4	3	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/4/2016	5	2	2	4	6	8	4	4	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/4/2016	4	6	4	4	4	9	8	5	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/4/2016	5	4	0	6	6	6	5	6	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/4/2016	6	8	8	5	7	6	7	6	7
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/4/2016	6	6	8	4	7	8	5	4	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/4/2016	5	6	5	5	5	4	5	5	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/4/2016	4	4	4	5	6	8	4	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/4/2016	5	3	0	3	6	8	6	7	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/4/2016	8	5	6	4	6	5	6	5	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/4/2016	5	0	4	6	8	8	5	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/4/2016	4	2	0	2	6	6	7	5	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/4/2016	5	5	0	7	6	12	6	4	6
ความเร็วลมเฉลี่ย										5.13

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง
เดือน พฤษภาคม 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/5/2016	3	2	2	2	6	5	4	5	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/5/2016	4	7	3	3	6	7	5	3	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/5/2016	6	3	0	3	5	6	6	4	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/5/2016	5	3	0	5	6	6	5	2	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/5/2016	2	0	0	5	7	7	4	6	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/5/2016	4	8	5	5	4	3	5	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/5/2016	5	0	4	5	10	5	6	6	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/5/2016	5	5	3	7	9	5	7	3	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/5/2016	3	5	4	2	3	3	2	2	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/5/2016	2	6	5	4	8	6	3	5	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/5/2016	2	3	6	4	7	5	7	6	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/5/2016	4	5	3	5	5	3	6	3	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/5/2016	5	6	6	8	5	5	6	2	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/5/2016	0	0	0	4	0	7	0	4	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/5/2016	5	5	4	3	0	0	0	3	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/5/2016	0	0	0	5	0	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/5/2016	6	3	0	0	0	4	3	4	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/5/2016	0	0	0	0	4	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/5/2016	0	0	0	2	5	8	5	4	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/5/2016	6	0	0	2	0	0	5	3	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/5/2016	5	0	0	8	10	8	10	8	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/5/2016	6	7	10	9	5	5	10	10	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/5/2016	10	14	6	4	8	6	8	10	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/5/2016	5	10	9	10	12	4	11	10	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/5/2016	10	10	8	10	6	5	8	11	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/5/2016	11	10	12	12	8	13	12	8	11
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/5/2016	14	10	10	10	9	9	10	9	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/5/2016	10	12	10	8	8	10	10	10	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/5/2016	8	6	6	4	7	4	4	7	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/5/2016	5	5	6	2	6	5	5	5	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	31/5/2016	9	7	0	0	0	0	0	0	2
ความเร็วลมเฉลี่ย										5.06

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง

เดือน มิถุนายน 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/6/2016	0	6	5	12	6	5	5	6	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/6/2016	8	8	6	5	6	2	4	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/6/2016	10	9	8	2	0	0	0	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/6/2016	0	0	0	0	3	0	0	0	0
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/6/2016	0	14	6	5	10	5	0	0	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/6/2016	0	0	2	2	4	0	3	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/6/2016	5	0	0	0	5	0	6	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/6/2016	0	0	0	0	6	8	6	5	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/6/2016	4	0	4	4	5	8	10	4	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/6/2016	5	6	0	4	8	6	10	3	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/6/2016	0	0	0	0	10	5	6	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/6/2016	5	6	6	7	10	10	8	10	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/6/2016	10	8	4	8	10	6	10	6	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/6/2016	6	8	7	6	6	10	8	12	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/6/2016	12	10	7	10	7	7	0	0	7
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/6/2016	0	0	0	0	10	0	5	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/6/2016	3	0	0	0	3	0	7	6	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/6/2016	0	3	2	2	0	2	0	5	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/6/2016	0	0	0	4	6	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/6/2016	0	5	0	0	5	8	7	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/6/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	-
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/6/2016	0	4	0	3	4	4	3	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/6/2016	12	8	10	8	12	12	8	12	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/6/2016	12	7	8	0	0	9	9	10	7
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/6/2016	0	5	8	8	8	4	5	8	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/6/2016	6	3	5	7	9	9	4	0	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/6/2016	10	0	0	0	0	0	9	7	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/6/2016	4	7	7	4	5	4	0	10	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/6/2016	10	10	10	8	10	12	13	8	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/6/2016	8	8	12	14	14	8	6	5	9
ความเร็วลมเฉลี่ย										4.76

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง

เดือน กรกฎาคม 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/7/2016	10	3	10	13	5	6	0	10	7
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/7/2016	4	5	6	0	4	0	4	5	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/7/2016	0	0	0	4	2	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/7/2016	0	4	9	4	10	8	4	2	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/7/2016	0	5	5	4	5	5	6	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/7/2016	0	0	5	5	4	5	5	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/7/2016	0	0	0	0	5	7	10	10	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/7/2016	8	10	9	7	8	13	10	10	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/7/2016	10	9	10	12	8	0	0	0	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/7/2016	0	5	0	0	4	7	11	8	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/7/2016	8	5	12	10	8	5	10	8	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/7/2016	8	4	8	8	10	9	9	10	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/7/2016	4	5	5	10	9	10	5	0	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/7/2016	0	0	0	0	4	6	5	7	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/7/2016	5	6	6	5	8	4	0	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/7/2016	8	9	0	3	4	3	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/7/2016	4	0	0	0	4	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/7/2016	4	0	0	0	6	5	4	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/7/2016	0	4	3	0	0	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/7/2016	0	9	0	5	4	7	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/7/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	-
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/7/2016	0	0	0	0	5	3	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/7/2016	0	0	0	0	4	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/7/2016	0	3	0	5	4	6	4	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/7/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	-
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/7/2016	0	0	10	0	0	0	5	5	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/7/2016	9	0	0	4	8	5	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/7/2016	0	0	3	5	6	9	8	11	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/7/2016	10	3	0	0	6	8	7	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/7/2016	0	0	0	5	8	6	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	31/7/2016	4	4	0	5	4	6	5	10	5
ความเร็วลมเฉลี่ย										3.93

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง
เดือน สิงหาคม 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/8/2016	5	0	0	0	9	5	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/8/2016	0	10	11	8	10	7	10	10	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/8/2016	10	4	10	6	6	10	9	13	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/8/2016	8	8	8	6	10	8	10	8	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/8/2016	8	0	0	0	4	6	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/8/2016	0	0	0	3	6	7	4	9	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/8/2016	8	0	0	8	7	6	5	10	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/8/2016	13	14	10	6	12	12	8	14	11
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/8/2016	12	6	10	10	8	11	12	8	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/8/2016	12	8	12	10	10	5	12	14	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/8/2016	8	4	5	6	7	5	5	8	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/8/2016	8	7	7	10	7	10	5	3	7
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/8/2016	7	12	12	10	10	12	9	14	11
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/8/2016	10	10	8	7	10	10	9	5	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/8/2016	8	10	10	9	9	8	6	8	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/8/2016	6	12	12	8	8	8	10	2	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/8/2016	8	10	10	10	10	8	8	9	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/8/2016	10	9	9	7	10	10	6	8	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/8/2016	5	7	6	10	12	10	12	13	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/8/2016	13	12	14	12	8	8	5	5	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/8/2016	5	4	4	5	8	10	10	7	7
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/8/2016	8	3	0	0	0	9	0	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/8/2016	0	5	3	5	10	8	11	9	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/8/2016	0	0	0	0	4	5	6	5	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/8/2016	8	3	0	0	7	6	7	5	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/8/2016	9	11	0	0	6	6	0	5	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/8/2016	0	3	9	5	6	5	5	5	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/8/2016	6	4	0	0	0	8	4	10	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/8/2016	0	3	0	0	0	4	5	7	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/8/2016	3	0	0	0	0	7	0	6	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	31/8/2016	0	0	0	5	7	10	6	5	4
ความเร็วลมเฉลี่ย										6.55

ข้อมูลความเร็วลมสถานีตรวจอากาศ รหัสสถานี 478201/48478 ชื่อสถานี ระยอง จ.ระยอง

เดือน กันยายน 2559

รหัสสถานี-สถานี-จังหวัด	วันที่	เวลาทำการตรวจ								เฉลี่ย
		0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	
478201-ระยอง จ.ระยอง	1/9/2016	6	5	6	4	6	5	10	0	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	2/9/2016	4	5	2	7	6	9	4	9	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	3/9/2016	5	2	0	6	0	0	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	4/9/2016	0	5	4	5	9	7	6	0	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	5/9/2016	0	0	5	5	8	8	10	10	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	6/9/2016	9	8	6	8	8	5	6	11	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	7/9/2016	12	12	0	10	11	11	8	13	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	8/9/2016	6	6	6	11	10	11	8	6	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	9/9/2016	10	4	8	8	8	10	9	10	8
478201-ระยอง จ.ระยอง	10/9/2016	4	4	5	5	9	4	5	9	6
478201-ระยอง จ.ระยอง	11/9/2016	2	0	0	0	0	0	8	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	12/9/2016	0	0	0	0	5	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	13/9/2016	0	0	0	0	6	5	5	4	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	14/9/2016	4	11	14	11	8	10	8	10	10
478201-ระยอง จ.ระยอง	15/9/2016	8	0	4	6	4	5	8	3	5
478201-ระยอง จ.ระยอง	16/9/2016	7	10	10	8	8	8	9	10	9
478201-ระยอง จ.ระยอง	17/9/2016	8	7	0	0	10	7	0	0	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	18/9/2016	6	0	0	0	7	7	4	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	19/9/2016	0	0	0	4	8	8	0	3	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	20/9/2016	6	3	2	2	3	0	8	3	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	21/9/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	-
478201-ระยอง จ.ระยอง	22/9/2016	0	0	0	5	4	3	0	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	23/9/2016	5	0	0	0	2	6	4	0	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	24/9/2016	0	0	0	0	6	5	0	3	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	25/9/2016	7	0	0	0	0	0	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	26/9/2016	0	0	0	0	0	4	0	0	1
478201-ระยอง จ.ระยอง	27/9/2016	0	0	0	0	6	0	4	4	2
478201-ระยอง จ.ระยอง	28/9/2016	0	0	0	4	9	8	10	2	4
478201-ระยอง จ.ระยอง	29/9/2016	0	3	0	0	10	5	3	0	3
478201-ระยอง จ.ระยอง	30/9/2016	0	0	0	4	7	0	0	3	2
ความเร็วลมเฉลี่ย										4.31



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



TREC-9

Thailand Renewable Energy for Community Conference

Abstract

ประชุมสัมมนาวิชาการ
 รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9
 The 9th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-9)
29 พฤศจิกายน -1 ธันวาคม 2559
 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (โดยสภากีฬ)



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช	อินตะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร	ไชยญาติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนาพล	มีนา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัชชัย	โรยรินรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนันท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร	ปัญญาใหญ่	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์	ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	ยีนยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์	จันทร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ	ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา	ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปัญญาธิ	นิยมवास	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.วิเชียร	อุปแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ดร.สหัททยา	ทองสาร	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ดร.ภาสวรรณ	วัชรดำรงศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.จักรกฤษณ์	เคลือบวัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.ยุธนา	ศรีอุดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.วรวิภา	ยงประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร.วรจิตต์	เศรษฐพรศักดิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ดร.อำพล	อาภาธนากร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ
ดร.ณนิต	เกตุประดิษฐ์	บริษัท เอ็นจีไอ จำกัด



ผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)

สารจากอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นสถาบันอุดมศึกษาที่ให้ความสำคัญกับการวิจัยและบริการวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แก่สังคมและชุมชน ที่ผ่านมามีความร่วมมือระหว่างสถาบันอุดมศึกษาและหน่วยงานภาครัฐอื่น ตลอดจนภาคเอกชนต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องจนเกิดการบูรณาการองค์ความรู้ที่นำไปสู่การพัฒนาคุณภาพการศึกษา สังคม ชุมชน และประเทศชาติ

ปัญหาความต้องการใช้พลังงานและมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิต เป็นปัญหาที่นานาประเทศให้ความสนใจและรณรงค์ให้มีการลดการใช้พลังงานสำหรับประเทศไทยซึ่งโดยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพด้านเกษตรกรรม โดยต้องนำเข้าพลังงานมากกว่าร้อยละ 60 ของความต้องการ ดังนั้นการพัฒนาพลังงานทางเลือกต่าง ๆ ให้เป็นนวัตกรรมทางพลังงาน จึงมีความสำคัญต่อชุมชน สังคม และประเทศไทยอย่างยิ่ง

ในนามมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ขอแสดงความชื่นชมและยินดีที่จะสนับสนุนการจัดประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้เพียรพยายามศึกษาค้นคว้าจนเกิดองค์ความรู้ใหม่ซึ่งจะเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาองค์ความรู้ทางเทคโนโลยีและนวัตกรรมให้ก้าวหน้าและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับโลกพลังงานยุคใหม่ต่อไป

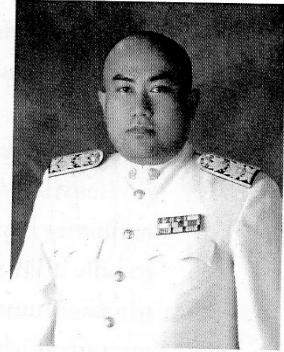
(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทพร สงศ์ธนาพิทักษ์)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

สารจากนายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ในนามของนายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ซึ่งได้ก่อตั้งขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษา วิจัย สนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนของประเทศอย่างยั่งยืน โดยเน้นการนำพลังงานและรูปแบบการจัดการพลังงาน เพื่อนำไปใช้ได้จริงอย่างเหมาะสมต่อชุมชนในประเทศไทย เพื่อให้เกิดผลได้อย่างแท้จริงจากการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานสะอาด ซึ่งรวมถึงการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ชีวมวล และพลังงานจากน้ำ ซึ่งเป็นพลังงานต้นกำเนิดที่มีอยู่ในชุมชนทุกที่ การจัดประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9 นี้เป็นการจัดงานในรูปแบบใหม่อีกครั้งหนึ่งของสมาคมฯ ซึ่งจะเป็ประโยชน์เป็นอย่างยิ่งต่อนักวิชาการ นักศึกษา และประชาชนทั่วไปในการแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ในการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ในชุมชน โดยจะมีผลต่อการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศอย่างเหมาะสม จะทำให้เราอยู่ร่วมกับธรรมชาติและสามารถพึ่งพาตนเองได้ในอนาคต โดยสมาคมจะเป็นศูนย์กลางในการดำเนินกิจกรรมที่ดี ทางด้านพลังงานที่ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ความมั่นคง การบริหารจัดการที่เหมาะสม การสร้างรายได้ให้กับชุมชน อย่างยั่งยืนคู่กับประเทศไทยตลอดไป

ในฐานะตัวแทนของสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ขอโอกาสพิเศษนี้ใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เจ้าภาพในการจัดงานประชุมสัมมนาวิชาการในครั้งนี้ และท่านที่ปรึกษา กิตติมศักดิ์ของสมาคมฯ ผู้สนับสนุนทุกท่าน รวมถึงทีมงานในการจัดงานครั้งนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าการจัดงานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9 ในครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงด้วยดี และเป็นประโยชน์ต่อองค์ความรู้โดยรวมทั้งภาคชุมชน และภาควิชาการของประเทศไทยต่อไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรัชย์ โรชนรินทร์)
นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย



สารบัญ

กลุ่มที่ 1 ไฟฟ้าชุมชน		หน้า
023	อุปกรณ์ทดสอบศักยภาพกำลังคลื่นทะเลใกล้ชายฝั่งชนิดทุ่นลอย	2
034	การศึกษาเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ แกนเดียว	11
036	การลดอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ครีความร้อนอุณหภูมิต่ำ	19
039	การจำลองระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าด้วยมอเตอร์กระแสตรงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแส ตรงที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัตราส่วนความเร็วปลายใบ	27
043	ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบ กริด ที่ติดตั้งบนหลังคาในพื้นที่ศูนย์การเรียนรู้สิรินธรแพรวทองจังหวัดพัทลุง	42
044	สมรรถนะของการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบกริด ที่ติดตั้งบนหลังคา ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 3.5 กิโลวัตต์สูงสุด ณ ศูนย์การเรียนรู้สิรินธรแพรวทอง จังหวัดพัทลุง	52
049	การศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค: กรณีศึกษาการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคบ้านหินกอง	67
055	การสร้างเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรความเร็วรอบต่ำ โดยใช้ แพลนเนตตารีเกียร์	74
058	การศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพการทำงานของ กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์	81
059	การออกแบบติดตั้งและทดสอบกังหันน้ำขนาดเล็กเพื่อการผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์	92
060	ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อน ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับเลนส์เฟรสเนล	100
063	การออกแบบสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแรงดันต่ำพลังงานแสงอาทิตย์และ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สำหรับชุมชน	108
065	ผลกระทบจากการถ่ายทอดเทคโนโลยีการจัดการเรียนการสอนโดยใช้ eDLTV ร่วมกับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	114
068	การศึกษาผลกระทบของการกีดขวางการไหลของลมเนื่องจากอาคารที่มีต่อ ประสิทธิภาพกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์โดยใช้วิธีแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล	122



การศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพการทำงานของ
กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์
THE STUDY OF AIR FLOW OBSTRUCTION EFFECT ON SMALL WIND
MACHINE PERFORMANCE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

ศิริพร สุขกุล^{1*}, วิรัชย์ โยชนรินทร²
Siriporn Sukkul^{1*}, Wirachai Roynarin²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110
E-mail : Siriporn_suk@rtaf.mi.th, Tel.083-2960261

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก 5 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ณ ศูนย์ฝึกศึกษานานาชาติปรีโครเลียมพลังงานทหาร จระเขยง ดำเนินงานวิจัยโดยทำการเก็บข้อมูลการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์และจำลองโมเดล 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWork และวิเคราะห์ข้อมูลการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล(CF-Design) ที่ความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุด 10 เมตรต่อวินาที ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ ผ่านกลุ่มอาคารต่างๆ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่ตำแหน่งการติดตั้งกังหันลมตัวที่ 1,2 และ 3 จากผลการวิเคราะห์การขวางการไหลของอากาศ พบว่าความเร็วลมลดลงเห็นได้ชัดเจนในตำแหน่งกังหันลมตัวที่ 1 ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 13,326.06 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ลดลง 68% เมื่อเทียบกับไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลของอากาศ และได้ทดลองเพิ่มระยะห่างการติดตั้งกังหันลมเท่ากับ 12,18 และ 24 เมตร พบว่าความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุดที่ระยะ 24 เมตร วิเคราะห์ความเร็วลมที่ผ่านใบพัดกังหันลมตัวที่ 2 และ 3 ความเร็วลมลดลง 41.9 และ 40.4 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาเห็นได้ว่าระยะทางและความสูงของสิ่งกีดขวางการไหลของอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ABSTRACT

The objective of this research is to study of air flow obstruction effect on wind turbine generator to the performance of 50 kW 3 wind turbine (WT1, WT2,WT3) from Defense Energy training Center, (DETC).The CFD commercial program of CF-Design V 9.0 was used for data analysis. The CFD speed velocity was set at 10 m/s for northeast (NE) and southeast (SE) air flow observation around the building A, B, C and D respectively. The data was collected and determined at the position WT1, WT2 and WT3 respectively. The results show that the WT1 was the lowest speed velocity decrease to 25.62% in the NE and 69.79% in the SE investigation. The data also shows that 5kW Wind turbine generator for 43,000 kW hour per year only generated 13,929.06 kW hour per year which decreased the performance to 68.2% comparing with without fluid barrier due to the building height. The building height causes turbulence from the at the back of the building lead to wind power generate lower than without fluid barrier. Additional, wind turbine distance at 12, 18 and 24 meter were observed for wind speed velocity without fluid barrier. Wind turbine was set in the same line at 270 degree angle from the hub. Wind speed velocity of 24 meter distance was collected as WT2 and WT3. The results of this research and study from CFD show that wind speed velocity was reduced to 41.9% and 40.4% respectively. Thus, the more distance between wind turbines the less turbulence affected to wind power.

คำสำคัญ : พลศาสตร์ของไหล, ความเร็วลม, กังหันลมผลิตไฟฟ้า

KEYWORDS : Fluid dynamics, wind speed, wind turbine

1. บทนำ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการขวางการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ระยะห่างระหว่างเสาถึงกันลมเท่ากับ 18 เมตร จำนวน 3 ตัว โดยสังเกตการไหลของอากาศเมื่อเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มอาคารบริเวณศูนย์ศึกษาการด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือ(NE)และทิศตะวันตกเฉียงใต้(SW)และวิเคราะห์การไหลของอากาศเมื่อเคลื่อนที่ผ่านหน้าใบพัดของกังหันลมด้วยการจำลองรูปแบบการไหลของอากาศที่ระยะห่างระหว่างเสาถึงกันลมเท่ากับ (2D)12เมตร,(3D)18เมตร และ(4D)24 เมตรและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics,CFD) มีรายละเอียดทางเทคนิคของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ดังนี้

- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบ (Diameter) 6 m
- พื้นที่กวาดใบ (Swcpt Area) 28.27 m²
- จำนวนใบ 3 ใบ
- ความสูงของคอกังหัน (Hub Height) 18 m
- ความเร็วลมเริ่มผลิตไฟฟ้า (Cut-in Wind Speed) 2.5 m/s
- ความเร็วลมหยุดทำงาน (Cut-Out Wind Speed) 12 m/s
- รูปแบบการเชื่อมต่อ Grid Connected

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการไหลของอากาศที่มีสิ่งกีดขวางการไหล ด้วยแบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาด 5 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว และอาคารภายในศูนย์ศึกษาการด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) (CFD) วิเคราะห์การสูญเสียในทางคณิตศาสตร์และดูผลกระทบการไหลของอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลังงานของลม [1] กังหันลมได้รับพลังงาน โดยการเปลี่ยนแปลงแรงของลมไปเป็นทอร์ค (Torque) ที่กระทำต่อบางกังหัน(Rotor Blades) ปริมาณของพลังงานลมที่ส่งผ่านไปยังใบกังหันขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Air Density) พื้นที่ของโรเตอร์ (Rotor Area) และความเร็วลม (Wind Speed) โดยปัจจัยแรกนั้น พลังงานจลน์ของลมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งกล่าวถึงปริมาณมวลต่อหน่วยปริมาตรหรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ กังหันลมจะได้รับพลังงานจากอากาศมากขึ้นเมื่อความหนาแน่นของอากาศมีค่าสูงขึ้น โดยทั่วไปแล้วความดันบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 15 °C อากาศจะหนักประมาณ 1.225 kg/m³ โดยความหนาแน่นของอากาศจะลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้นหรืออุณหภูมิสูงขึ้น และความหนาแน่นของอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลงหรืออุณหภูมิต่ำลง

กำลังงานจากลม เป็นพลังงานจากการเคลื่อนที่ของวัตถุขึ้นอยู่กับสองตัวแปร ได้แก่ มวล (m) และความเร็ว (V_∞) ถ้ามวลของอากาศคงที่ ดังนั้นพลังงานลมจึงแปรผันตามความเร็วของลม สามารถเขียนสมการพลังงานของลมได้ในรูปของพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของลมที่เคลื่อนที่ไปเขียนได้ตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$E_K = \frac{1}{2} m_a V_\infty^2 \dots\dots\dots(1)$$

- โดยที่
- E_K = พลังงานจลน์ (J)
 - m_a = มวลของอากาศ (kg)
 - V_∞ = ความเร็วลม ($\frac{m}{s}$)

กำลังงานจากลม (Wind Power) คือ งานที่ลมทำได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา กำลังงานจากลมจึงเป็นไปตามสมการที่ (2)

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 \dots\dots\dots(2)$$

- โดยที่
- P_a = กำลังงานที่ได้จากลม (Watt)
 - ρ_a = ความหนาแน่นอากาศ ($\frac{kg}{m^3}$)
 - A = พื้นที่หน้าตัด (m²)
 - V_∞ = ความเร็วลม ($\frac{m}{s}$)



กำลังงานจากกังหันลม (Power Wind Turbine)
สำหรับค่ากำลังงานเฉลี่ยของกังหันลมสามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A V_\infty^3 C_p \dots \dots \dots (3)$$

โดยที่ P_a = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม (Watt)

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นอากาศ } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

$$A = \text{พื้นที่กวาดของใบกังหัน } (m^2)$$

$$V_\infty = \text{ความเร็วลมเข้าใบพัด } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$C_p = \text{ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม}$$

ตามทฤษฎีของ อัลเบิร์ต เบตซ์ (Albert Betz) [13] นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม (A) ความเร็วลม และลักษณะของใบของกังหันลม โดยกำลังงานสูงสุดที่กังหันลมสามารถสกัดได้คือ

$$P_{Tmax} = \frac{16}{27} A \rho V_1^3 \dots \dots \dots (4)$$

ประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมคือ 59.26% ($\frac{16}{27} \times 100\%$) จากการศึกษาที่กำหนดให้

$$C_p = 0.5, C_T = 0.89$$

ทฤษฎีการออกแบบกังหันลม

ทฤษฎีสตริป (Strip Theory) บางครั้งจะเรียกทฤษฎีนี้ว่า Glauert Annulus Momentum Vortex Theory เป็นการแบ่งโดเมนของการไหลผ่านใบกังหันออกเป็นวงแหวนในแนวรัศมี (r) ของใบ (Strip หรือ Annular Stream Tube) แล้วทำการวิเคราะห์การถ่ายเทมวลและโมเมนตัมในวงแหวนนี้ภายใต้ Strip Theory จะมีทฤษฎีย่อยๆ ประกอบอยู่ด้วยดังนี้ [8]

ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum Theory) การวิเคราะห์โดยใช้หลักการของทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum Theory) ในเบื้องต้นจะตั้งสมมุติฐาน (Assumption) ขึ้นมาดังนี้

- ลมที่พัดเข้ามาจะต้องมีการไหลที่

สม่ำเสมอต่อเนื่อง (Homogeneous Wind Flow)

- ไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลทางเข้า

อุโมงค์ลม และทางออกของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการ

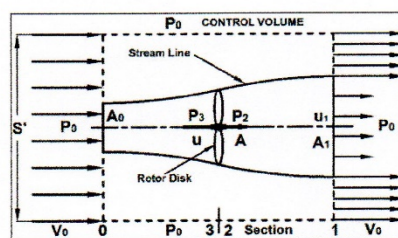
ทดสอบ (No Obstruction to Wind Flow Either Upstream or Downstream)

- การเคลื่อนที่ของลมไม่มีการปั่นป่วน

ที่ใบกังหัน (Uniform Flow Velocity at Rotor)

- ลมที่ไหลเข้ามาต้องคิดว่าเป็นของ

ไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Wind Flow) ซึ่งไม่มีผลในเรื่องของอุณหภูมิ (Temperature Effect) มากนักเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์



รูปที่ 1 หลักการของทฤษฎี Momentum Theory [8]

วิเคราะห์รูปที่ 1 มีตัวแปรใดบ้างที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมทุก ๆ ชนิด ตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องทราบคือ S' เท่ากับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่เราใช้อยู่ในขอบเขตของการวิเคราะห์ปริมาตรทั้งหมดของระบบ (Control Volume)

โดยที่ V_0 คือ ความเร็วลมทางด้านเข้าและทางด้านออกของ Control volume (m/s)

U คือ ความเร็วลมก่อนที่จะถึงด้านหน้าของใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m/s)

U_1 คือ ความเร็วลมหลังจากผ่านตัวใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ทดสอบ (m/s)

P_0 คือ ความดันบรรยากาศทั่วไป (N/m²)

P_2 คือ ความดันของอากาศที่ไหลผ่านตัวใบกังหัน (N/m²)

P_3 คือ ความดันของอากาศก่อนที่จะปะทะตัวใบกังหัน (N/m²)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวใบกังหัน (m²)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดทางเข้าของอุโมงค์ลมที่ใช้

ในการวิเคราะห์ (m²)

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดทางออกของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^2)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m^3/s)

ในการวิเคราะห์ทฤษฎีของ Momentum นั้นเราสมมติว่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิต้องฟ้าปกคลุมมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.225 kg/m^3 และจากกฎของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity Equation) [14] นั้นการไหลต้องเท่ากันทั้งระบบนั่นคือ $Q = A \cdot V$ จะได้ $V_0 A_0 = uA = u_1 A_1$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมนั้น ตัวแปรที่สำคัญคือ C_p (Power coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ตัวกังหันลมได้ดึงเอาไว้ P_w เปรียบเทียบกับตัวพลังงานที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a นั่นคือ ถ้าวิเคราะห์กันทางกลก็คือกำลังงานเท่ากับพลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าให้สู่ระบบนั่นเอง ในทางวิศวกรรมของพลังงานลมนี้เราสามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมได้คือ

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} \dots (5)$$

ดังนั้นค่า $C_p = 4a(1-a)^2 \dots (6)$

$$C_p = 4a - 8a^2 + 4a^3 \dots (7)$$

ดังนั้นถ้าต้องการทราบว่ากังหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดได้เท่าใด สามารถหาได้โดยการ Differentiate สมการที่ (7)

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

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

$$3a^2 - 4a + 1 = 0 \text{ ดังนั้นจะได้ } a \text{ คือ}$$

$$a = \frac{4 \pm \sqrt{(-4)^2 - 4 \times 3 \times 1}}{2 \times 3}, a = \frac{4 \pm \sqrt{4}}{6}$$

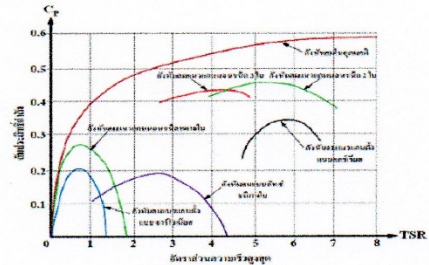
$$a = \frac{2}{3} \pm \frac{1}{3}$$

สมการจะเป็นจริงได้มีค่า a แค่ 2 ค่า คือ

$$a = 1 \text{ และ } a = \frac{1}{3}$$

ดังนั้น ถ้าเราแทนค่า $a = \frac{1}{3}$ ลงในสมการที่

(7) เราจะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลม ซึ่งเราเรียกว่า $C_{p_{max}}$ นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 นั่นคือถ้าลมให้พลังงานมา 100% กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26 % เนื่องด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่าง ๆ ว่าไม่มีกังหันลมชนิดใดที่สามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพได้ถึง 45% ด้วยซ้ำไปแต่อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบชุดกังหันลมให้มีประสิทธิภาพรวมได้ถึง 30-35 % ก็ถือว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูงแล้วเนื่องจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ไม่ใช้การสันดาปเหมือนกับเครื่องยนต์ความร้อน ทำให้ไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะเป็นพลังงานที่สะอาดและจะไม่มีวันหมดไปเหมือนพลังงานจากเชื้อเพลิงสารไฮโดรคาร์บอนที่จำเป็นต้องใช้การเผาไหม้ในการได้งานมานั่นเอง

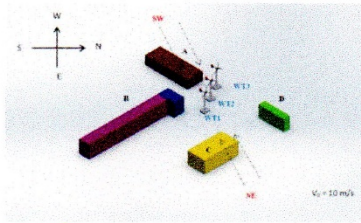


รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่าง ๆ [11]

4. วิธีการวิจัย

1. การวิเคราะห์การไหลของอากาศเมื่อเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มอาคารบริเวณศูนย์ศึกษาดาราด้านปีโตรเลียมและพลังงานทหาร จ.ระยอง ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้





รูปที่ 3 จำลองทิศทางลมและกลุ่มอาคาร

ตารางที่ 1 ขนาดของอาคารและระยะห่างระหว่างอาคารกับกังหันลม

Building	Height (m)	Width (m)	Length (m)	Distance from WT1	Distance from WT2	Distance from WT3
A	9.25	18	51	35	24	20
B	15	12	113	25	30	45
C	9.25	18	51	60	70	87.5
D	13.3	7	30	47.5	50	55

1.1 กำหนดข้อมูลและตัวแปรต่างๆ

- กำหนดความเร็วลมทางเข้าโมเดล 10 m/s
- กำหนดให้อากาศเป็นการไหลแบบคงที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณด้านตะวันออกเฉียงเหนือ(NE)ไปทิศตะวันตกเฉียงใต้(SW)

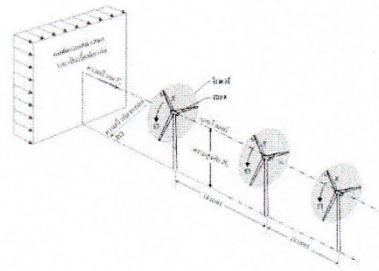
- ตั้งค่าเมช (Mesh) ให้ปรับขนาดอัตโนมัติ

1.2 วัดความเร็วลมบริเวณหน้าโรเตอร์กังหันลม

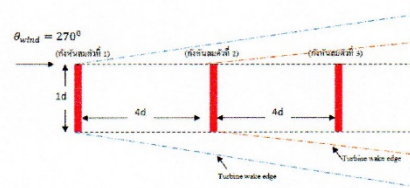
1.3 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมเมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านอาคารด้วยโปรแกรม CFD

1.4 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมขนาด 5kW ผลิตได้กับพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไป

2. การวิเคราะห์การไหลของอากาศ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านหน้าโรเตอร์ของกังหันลมที่ระยะห่างระหว่างเสา กังหันลมเท่ากับ (2D) 12 เมตร, (3D) 18 เมตร และ 4D (24 เมตร) ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้



รูปที่ 4 จำลองการติดตั้งกังหันลมที่ระยะ 18 เมตร (3D) [15]



รูปที่ 5 จำลองระยะการติดตั้งกังหันลมที่ระยะ 24 เมตร (4D)

2.1 แบ่งการวิเคราะห์ห้ออกแบบ 2 ส่วน คือ ภายในสตรีมทูปและนอกสตรีมทูปโดยพิจารณาว่า

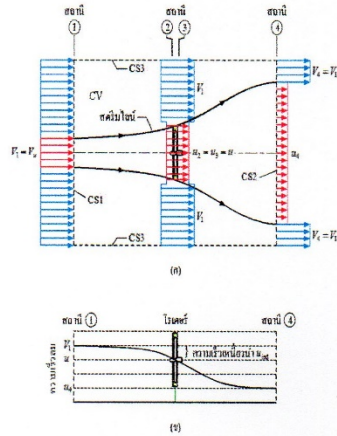
- โรเตอร์ของกังหันลมถูกพิจารณาว่าเป็นแผ่นแอคชูเอเตอร์ (actuator disc) มีพื้นฐานวงกลมแบน และบางมาก

- มีการไหลของอากาศเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) และเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous)

2.2 กำหนดข้อมูลและตัวแปรต่างๆ

- ทางเข้าปริมาตรควบคุมที่ผิวควบคุม CS1 มีพื้นฐานวงกลม กำหนดให้เป็นสถานี ①

- ทางออกปริมาตรควบคุมที่ผิวควบคุม CS2 มีพื้นฐานวงกลม อยู่ที่สถานี ④



รูปที่ 6 ความเร็วลมในสตรีมรูป [15]

2.3 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมเมื่อ
อากาศเคลื่อนที่ผ่านหน้าโรเตอร์กังหันลมที่ระยะ 2D, 3D
และ 4D ด้วยโปรแกรม CFD

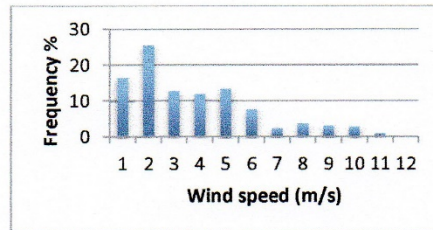
5. ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลลม จากกรม
อุตุนิยมวิทยา ช่วงระหว่างเดือนตุลาคม 2558 ถึงเดือน
ตุลาคม 2559 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความเร็วลมเฉลี่ย
รายปีอยู่ที่ 3.81 m/s ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยเดือนที่มี
ค่าความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่เดือนสิงหาคม มีค่า
ความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 6.55 m/s

ตารางที่ 2 ความเร็วเฉลี่ยรายเดือน

เดือน/ปี	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)
ตุลาคม 2558	1.7
พฤศจิกายน 2558	3.67
ธันวาคม 2558	1.93
มกราคม 2559	2.81
กุมภาพันธ์ 2559	3.19
มีนาคม 2559	4.26
เมษายน 2559	5.13
พฤษภาคม 2559	5.06
มิถุนายน 2559	4.76
กรกฎาคม 2559	3.93
สิงหาคม 2559	6.55
กันยายน 2559	4.31
ตุลาคม 2559	2.35
เฉลี่ย	3.81

การแจกแจงความถี่ของความเร็วลม เป็น
เปอร์เซ็นต์ความถี่ในการเกิดลมที่ความเร็วลมขนาดต่างๆ
โดยความถี่การเกิดลมส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความเร็วลม
ระหว่าง 2 m/s

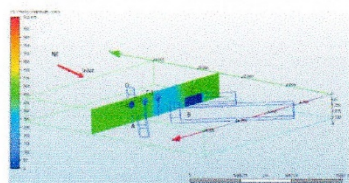


รูปที่ 7 เปอร์เซนต์ความถี่การกระจายตัวของความเร็วลม
ความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ยช่วงระหว่างเดือน
ตุลาคม 2558 ถึงเดือน ตุลาคม 2559 แสดงในตารางที่ 3

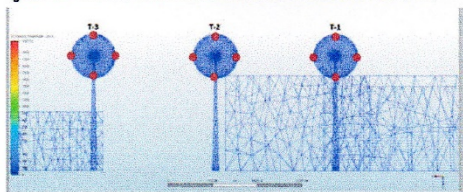
ตารางที่ 3 ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยรายเดือน

เดือน/ปี	ความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ย (m/s)
ตุลาคม 2558	9
พฤศจิกายน 2558	9
ธันวาคม 2558	9
มกราคม 2559	9
กุมภาพันธ์ 2559	9
มีนาคม 2559	10
เมษายน 2559	10
พฤษภาคม 2559	11
มิถุนายน 2559	15
กรกฎาคม 2559	13
สิงหาคม 2559	14
กันยายน 2559	11
ตุลาคม 2559	9
เฉลี่ย	10.6

จากตารางที่ 3 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความเร็วลมเฉลี่ยรายปีที่ 10.6 m/s จึงกำหนดให้การศึกษาโครงการนี้ใช้ความเร็วลมที่ 10 m/s วิเคราะห์ข้อมูลลมจากโปรแกรม CFD และกำหนดให้อากาศเคลื่อนที่ผ่านอาคารทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ได้ผลแสดงดังนี้



รูปที่ 8 กำหนดทิศทางลม ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE)

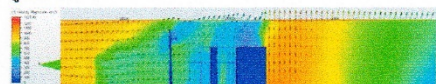


รูปที่ 9 ตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์ความเร็วลม

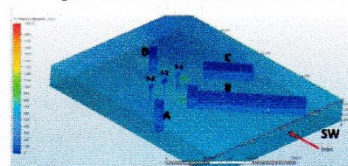
ตารางที่ 3 ตารางแสดงความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งหน้าโรงเดอรั้งหันลม ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE)

Point	ความเร็วลมที่ WT1 (m/s)	ความเร็วลมที่ WT2 (m/s)	ความเร็วลมที่ WT3 (m/s)
1	8.63244	8.83128	9.92501
2	8.39007	8.31023	9.84187
3	5.53883	7.42652	9.77648
4	7.18943	8.08913	9.86943
sum	29.75077	32.65716	39.41279
ave	7.437693	8.16429	9.85319
%de	25.62308	18.3571	1.468

จากตารางที่ 3 เมื่อลมเคลื่อนที่ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) พบว่าความเร็วลมที่ตำแหน่ง WT1 ลดลง 25.62% , WT2 ลดลง 18.35% , WT3 ลดลง 1.46% มีผลมาจากความสูงของอาคารกำลังพล (D) ขวางการไหลของอากาศทำให้เกิดการปั่นป่วน เกิดลมหมุนวนบริเวณด้านหลังอาคารกำลังลมจึงลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กำลังลมที่ตำแหน่ง WT1

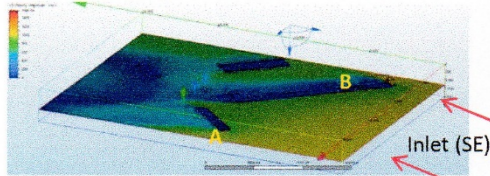


รูปที่ 11 กำหนดทิศทางลม ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ที่ความเร็วลม 10 m/s

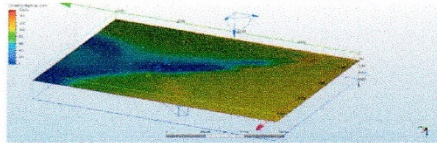
จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าอาคาร B,C มีผลต่อกำลังกระแสลมในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (SW) วัดความเร็วลมที่กังหันลมได้ดังแสดงในตารางที่ 4 ตารางที่ 4 ตารางแสดงความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งหน้าโรงเดอรั้งหันลม ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

Point	ความเร็วลมที่ WT1 (m/s)	ความเร็วลมที่ WT2 (m/s)	ความเร็วลมที่ WT3 (m/s)
1	3.06099	3.87653	9.9335
2	3.54412	1.9446	9.76565
3	2.92789	2.23882	9.86561
4	2.5488	4.26902	9.9234
sum	12.0809	12.32897	39.48816
ave	3.020225	3.08224	9.87204
%de	69.79775	69.1776	1.2796

จากตารางที่ 4 พบว่าความเร็วลมที่ตำแหน่ง WT1 ลดลง 69.79%, WT2 ลดลง 69.177%, WT3 ลดลง 1.27% มีผลมาจากความสูงของอาคารจัดเลี้ยงและอาคารที่พัก (A,B) ขวางการไหลของอากาศทำให้เกิดการปั่นป่วนลมหมุนวนบริเวณด้านหลังอาคาร กำลังลมจึงลดลง ดังแสดงใน รูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 12 ที่ความสูง 9.25 เมตร เท่ากับความสูงอาคาร A,C



รูปที่ 13 ที่ความสูง 18 เมตร เท่ากับความสูง Wind Turbine

ตารางที่ 5 พลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้

Wind Speed (m/s)	Power output (watt)	Energy output (kWh/day)	Energy output (kWh/year)
0	0	0	0
2	50	1.20	438.00
2.5	160	3.84	1,401.60

3	250	6.00	2,190.00
3.02	253.6	6.09	2,221.5
3.08	264.4	6.35	2,317.75
3.5	340	8.160	2,978.40
4	602	14.45	5,273.52
4.5	852	20.45	7,463.52
5	1325	31.80	11,607.00
5.5	1602	38.45	14,033.52
6	1860	44.64	16,293.60
6.5	2300	55.20	20,148.00
7	2620	62.88	22,951.20
7.4	2926.4	70.23	25,635.26
7.5	3003	72.072	26,306.28
8	3752	90.05	32,867.52
8.1	3,901.60	93.63	34,178.02
8.5	4500	108.00	39,420.00
9	4800	115.20	42,048.00
9.5	5000	120.00	43,800.00
9.8	5000	120.00	43,800.00
10	5000	120.00	43,800.00

ตัวอย่าง การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วลม 10 เมตร/วินาที เมื่อพัดผ่านตำแหน่ง WT1 ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE)

$$V_0 = 10 \text{ m/s}, V = 7.44 \text{ m/s}$$

$$P = 2926.4 \text{ watts} = 2.93 \text{ kW}$$

$$E = 2.93 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 70.23 \text{ kWh/day}$$

$$E = 70.23 \text{ kWh/day} * 365 \text{ day} * 0.5 = 12,817.63 \text{ kWh/year}$$

WT1 ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

$$V_0 = 10 \text{ m/s}, V = 3.02 \text{ m/s}$$

$$P = 253.6 \text{ watts} = 0.25 \text{ kW}$$

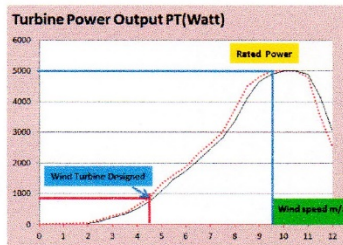
$$E = 0.25 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 6.09 \text{ kWh/day}$$

$$E = 6.09 \text{ kWh/day} * 365 \text{ day} * 0.5 = 1,111.425 \text{ kWh/year}$$

ดังนั้นจำนวนพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้มีค่าเท่ากับ

E = 12,817.63 kWh/year + 1,111.425 kWh/year
 E = 13,929.06 kWh/year

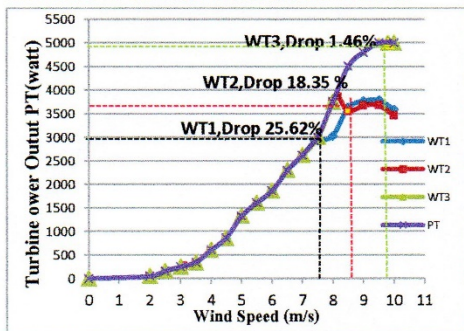
จากกราฟความสัมพันธ์ของข้อมูลจากเครื่องมือวัดกังหันลม วัดลมทิศทางและทิศทางของ บริษัทผู้ผลิตกังหันลมขนาด 5KW ได้กราฟความสัมพันธ์ Power Curve ดังนี้



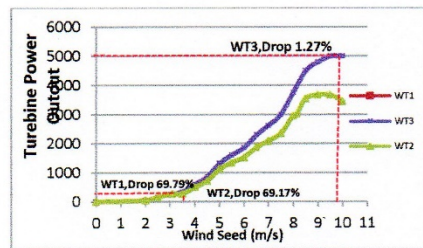
รูปที่ 14 Power Curve ของกังหันลม [7]

ผลการวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านอาคารที่ระยะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2,3 เปรียบเทียบพลังงานลมที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดังนี้

กราฟที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังลมที่วัดได้จริงกับกำลังลมที่วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD ที่ความเร็วลม 10 m/s ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE)

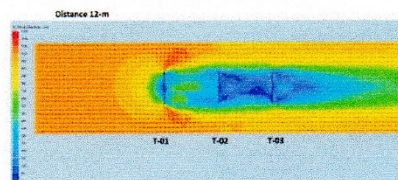


กราฟที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังลมที่วัดได้จริงกับกำลังลมที่วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD ที่ความเร็วลม 10 m/s ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)

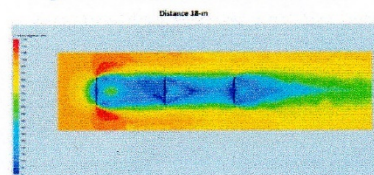


จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและกำลังงานลม(Power Curve) พบว่ากำลังงานลมที่กังหันลมควรผลิตได้แปรผันตามความเร็วลมสอดคล้องกับสมการกำลังงานกังหันลมที่ (3) เมื่อลมเคลื่อนที่ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ(NE)และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ด้วยความเร็วลม 10 m/s ผ่านอาคารกำลังพล(D) และอาคารที่พัก (B) ความสูงของอาคารเท่ากับ 13.1 และ 15 เมตร ขวางการไหลของอากาศ ทำให้กำลังงานลมของตำแหน่ง WT1,WT2 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในกราฟที่ 1,2

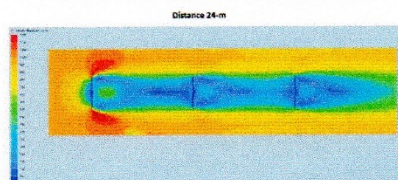
ทดลองออกแบบการติดตั้งกังหันลมที่ระยะ 12,18 และ 24 เมตรเพื่อดูการไหลของอากาศ วิเคราะห์จากโปรแกรม CFD มีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 15 ติดตั้งกังหันลมที่ระยะ 12 เมตร



รูปที่ 16 ติดตั้งกังหันลมที่ระยะ 18 เมตร



รูปที่ 17 ติดตั้งกังหันลมที่ระยะ 24 เมตร

ผลการทดลองวัดความเร็วลมที่ตำแหน่ง WT1, WT2, WT3 มีผลดังนี้
ตารางที่ 6 แสดงความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง

Distance Velocity	12 m.	18 m.	24 m.
WT1	10 m/s	10 m/s	10 m/s
WT2	5.52 m/s	5.61 m/s	5.96 m/s
WT3	3.47 m/s	4.90 m/s	5.81 m/s

จากตารางที่ 6 เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามระยะทางที่ติดตั้งกังหันลม และจากสมมติฐานในระเบียบวิธีวิจัยข้อที่ 2 เมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านหน้าโรเตอร์ในตำแหน่ง WT1 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าลมส่วนนี้ถูกโรเตอร์ดึงพลังงานจนออกจากลม ทำให้ลมถูกหน่วงความเร็วลง ความเร็วลมจึงลดลงดังแสดงในตารางที่ 6

6. สรุป

จากการศึกษาพบว่าติดตั้งกังหันลมขนาด 5 KW จำนวน 3 ตัว ที่ศูนย์ฝึกศึกษานอกคาบกรฯ จ.ระยอง อาคารบริเวณรอบศูนย์ฝึกศึกษาฯ ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีมีค่าเท่ากับ 3.81 m/s และความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ยรายปีมีค่าเท่ากับ 10 m/s ที่ความสูง 18 เมตร วิเคราะห์ความเร็วลมจากโปรแกรม CFD พบว่า ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ที่ตำแหน่ง WT1 วัดความเร็วลมมีค่าเท่ากับ 7.43 m/s , 3.02 m/s พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 13,929.06 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อปี ทำให้ประสิทธิภาพลดลงเฉลี่ย 68.2 % เมื่อเทียบกับไม่มีสิ่งกีดขวางการไหล ที่ตำแหน่ง WT2 วัดความเร็วลมมีค่าเท่ากับ 8.16 m/s , 3.08 m/s พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 18,247.98 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อปี ทำให้ประสิทธิภาพลดลงเฉลี่ย 58.33 % เมื่อเทียบกับไม่มีสิ่งกีดขวางการไหล ที่ตำแหน่ง WT3 วัดความเร็วลมมีค่าเท่ากับ 9.85 m/s , 9.87 m/s ประสิทธิภาพในการรับลมดี

ที่สุด ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 43,800 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อปี

จากผลการศึกษาดูจะเห็นได้ว่าระยะทางและความสูงของสิ่งกีดขวางการไหลของอากาศมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

7. ข้อเสนอแนะ

1. สามารถนำผลการวิเคราะห์ระยะห่างของกังหันลมขนาด 5KW ที่เหมาะสม เพื่อประกอบการพิจารณาติดตั้งกังหันลมในสถานที่ต่างๆ ได้
2. ควรเพิ่มเครื่องมือวัด เช่น Anemometer ติดตั้งในกังหันทั้ง 3 ตัว เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และมีความใกล้เคียงมากขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2546ก). พลังงานลม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.dede.go.th/dede/renew/wind_p.htm.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. โครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร, 2553
- [3] กรมอุตุนิยมวิทยา. ลมมรสุม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=52>
- [4] นิพนธ์ เกตุชัย และ อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์. (2547, กรกฎาคม-ธันวาคม). "เทคโนโลยี พลังงานลม," วารสารมหาวิทยาลัยนครสวรรค์. 12(2) . 57-73.
- [5] พินิจ สังข์ทอง. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 เมกะวัตต์ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [6] พิรุฬห์ วันดี. การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกลุ่มอาคาร. โครงการศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556.



[7] เอฟที เอนเนอร์จี. กังหันลมความเร็วรอบต่ำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :

<http://www.ft-energy.co.th/product-A-01.aspx>

[8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. โครงการศึกษาและผลิตต้นแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาดไม่น้อยกว่า 250 กิโลวัตต์. กรุงเทพมหานคร, 2555.

[9] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์. 2547. กลศาสตร์ของไหล. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

[10] วิรัช โยชนรินทร์. โครงการศึกษา วิจัย สาขิตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ. กรุงเทพมหานคร, 2550.

[11] Miguel Lopez, Jean-Claude Vannier, "STAND-ALONE WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM WITH MAXIMUM POWER TRANSFER CONTROL" *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 17 No 3, 2009, pp. 329-336.

[12] Energy Information Administration. (2004e). *Wind Energy*. [On-line]. Available: http://www.eia.doe.gov/wind_tech/energy.html.

[13] Yu-Ting Wu and Chang-Hung Chen . A Numerical Study of the Effects of Wind Direction on Turbine Wakes and Power Losses in a Large Wind Farm. *Wind Engineering and Renewable Energy Laboratory (WIRE) Switzerland, 2013.*

[14] Nak Joon Choi. *CFD Study on Aerodynamic Power Output Changes with Inter-Turbine Spacing Variation for a 6 MW Offshore Wind Farm*. School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2014.

[15] Panu Pratumnopharat. *NOVEL METHODS FOR FATIGUE DATA EDITING FOR HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADES*. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the University of Northumbria at Newcastle for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, 2012.

[16] Manwell, J.F. and McGowan, J.G. *Wind Energy Explained*. West Sussex: John Wiley & Sons, 2009.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	ศิริพร สุขกุล
วัน เดือน ปีเกิด	28 สิงหาคม 2533
ที่อยู่	2 หมู่ 2 ต.ป่าตาล อ.เมือง จ.ลพบุรี 15000
การศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศ กองทัพอากาศ พ.ศ. 2555 – ปัจจุบัน
โทรศัพท์	097-9793555
อีเมลล์	siriporn_suk@rtaf.mi.th

