

การวิเคราะห์ใบพัดกังหันลมด้วยปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบ 2 ทาง

Analysis of a Wind Turbine Blade by 2-way Fluid-Structure Interaction

ธนัท มนต์วิเศษ และพงศ์ธร พรหมบุตร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: thanatat.m@hotmail.com, pongtorn.p@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การคำนวณกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่นิยมใช้ใบพัดกังหันลมเป็นแบบแข็ง (rigid) ซึ่งจะไม่มีการเสียรูปของใบพัดมาคำนวณ แต่ในความเป็นจริงใบพัดมีการแอ่น การบิดจากแรงลมที่ปะทะ และการผลิตพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องนำการเสียรูปของใบพัดมาคิดด้วย งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการเสียรูปของใบพัดกังหันลมด้วยคุณสมบัติของแผ่นโครงสร้างคอมโพสิตแบบแซนวิช (Sandwich Composite) ใบพัดที่นำมาศึกษามีความยาว 33.25 เมตร (WindPact 1.5 MW) นำมาจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อศึกษาพลังงานที่ผลิตได้ วิเคราะห์ด้วยวิธีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (Fluid-Structure Interaction) เพื่อศึกษาการเสียรูปจากแรงลมที่ปะทะ พิจารณาที่ความเร็วลม 8-24 เมตรต่อวินาที เปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัด จากการคำนวณแบบทางเดียว (One-Way FSI) คำนวณหาพลังงานไฟฟ้าจากพลศาสตร์ของไหล (CFD) โดยใช้รูปร่างใบพัดตามที่ออกแบบ ยังไม่มีการเสียรูปมาคำนวณ จากนั้นส่งข้อมูลความดันที่กระทำต่อผิวใบพัดไปคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) เพื่อทำนายการเสียรูปของใบพัด และแบบสองทาง (Two-Way FSI) เริ่มคำนวณหาการเสียรูปของใบพัดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) แล้วนำรูปร่างใบพัดที่เสียรูปแล้วมาคำนวณด้วยพลศาสตร์ของไหล (CFD) เพื่อหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากนั้นในรอบที่สองส่งข้อมูลความดันที่กระทำต่อผิวใบพัดไปคำนวณหาการเสียรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) อีกครั้ง แล้วนำรูปร่างใบพัดที่เสียรูปจากการคำนวณรอบที่สองมาหาพลังงานไฟฟ้าด้วยพลศาสตร์ของไหล (CFD) ทำการคำนวณแบบวนรอบไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสัมประสิทธิ์โมเมนต์มีค่าลู่เข้าจึงหยุดการคำนวณ ผลการศึกษาพบว่าใบพัดชนิด WindPact 1.5 MW พลังงานที่ผลิตได้ของการคำนวณแบบทางเดียวกับแบบสองทางให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำการเปลี่ยนแปลงใบพัดโดยลดค่ามอดูลัส (modulus: E_x , E_y) ของเนื้อวัสดุลง 3 เท่า ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที การคำนวณพลังงานที่ผลิตได้แบบสองทาง 1.54 เมกะวัตต์ และแบบทางเดียว 1.45 เมกะวัตต์ ซึ่งแบบสองทางมีค่ามากกว่าแบบทางเดียวคิดเป็น 6.2 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วลม 16 เมตรต่อวินาที การคำนวณพลังงานที่ผลิตได้แบบสองทาง 1.57 เมกะวัตต์ และแบบทางเดียว 1.64 เมกะวัตต์ ซึ่งแบบทางเดียวมีค่ามากกว่าแบบสองทางคิดเป็น 4.27 เปอร์เซ็นต์ ผู้วิจัยมีความเชื่อว่าการคำนวณแบบสองทางให้ผลที่แม่นยำกว่าเพราะได้นำโครงสร้างที่มีการเสียรูประหว่างการทำงานมาคิดด้วย และสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการเผยแพร่แล้ว

คำสำคัญ :

ใบพัดกังหันลม; การเลี้ยวรูป; วัสดุคอมโพสิต; ปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง

Abstract

Calculation of wind turbines for electricity generation is mainly used to rigid which will not calculate the deformation. But in reality, the blade is bent, twisting from the wind that hits and the production of electric power requires the thought of deformation of the blade. This research focuses on studying the deformation of wind turbine blade. With the properties of sandwich composites, 33.25 meters (WindPact 1.5 MW) of the blade were simulated with computational fluid dynamics (CFD) to study the energy produced. Analysis by interaction between fluid and structure to study the deformation from the impact of wind considering that the wind speed is 8-24 meters per second compare the efficiency of the blade from one-way (FSI) calculations. Calculate the electrical energy from fluid dynamics (CFD) using the blade shape as designed. The deformation is not calculated. Then the pressure data was sent to the surface of the blade to be calculated using the finite element method (FEA) to blade the deformation of the blade. And Two-Way FSI began to calculate the deformation of the blade by finite element method (FEA) and then deformed the shape and calculated it with fluid dynamics (CFD) to find electrical energy Then produced in the second round, sent the pressure data to the blade surface to calculate the deformation by the finite element method (FEA) again and then the deformation of the shape from the calculation cycle Two come to find electrical power as well. The fluid (CFD) calculations a loop until the moment coefficient convergence. Therefore stop calculating. The study found that the windpact type 1.5 MW blade is the energy produced by one-way calculations. With the two-way model, the results were not significantly different and therefore change to the blade by reduce the modulus: E_x , E_y value of the material 3 times the wind speed of 12 meters per second. Calculation of the energy produced in two-way 1.54 megawatts and one-way 1.45 megawatts, which are two-way, is more than one-way, accounting for 6.2 percent and wind speed 16 meters per second. The calculation of the energy produced by in two-way 1.57 megawatts and one-way 1.64 megawatts, which is one-way, is more than two-way, accounting for 4.27 percent. A structure that is deformed during the work to come to think with and corresponds to the research that has been published.

Keywords :

Wind turbine blades; Deformation; Composite materials; Fluid and Structural interactions



1. คำนำ



ในการผลิตกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่นิยมใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นโครงสร้าง ในงานวิจัยนี้จะศึกษาพลังงานของใบพัดหลังการเสียรูป ใช้คุณสมบัติการเสียรูปของวัสดุคอมโพสิตเมื่อมีแรงลมปะทะ โดยใช้วิธีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างในการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาการแอ่นและการบิดที่เกิดขึ้นในขณะที่กังหันลมทำงาน จะมีผลต่อลักษณะโครงสร้างและพลังงานที่ผลิตได้

งานวิจัยที่ทำการอ้างอิง [1] ได้ทำใบพัดกังหันลมแนวนอน ขนาด 5 เมกะวัตต์ มีความยาว 63 เมตร วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (Fluid-Structure Interaction) ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computation fluid dynamics) แบ่งเป็น 2 ประเภทคือแบบทางเดียว (One-Way FSI) และแบบสองทาง (Two-Way FSI) ภายใต้ภาระกรรมที่ประมาณมาจากความเร็วลม 11.4 เมตรต่อวินาที พิจารณาเพียง 1 ใบพัด ได้ทำการเปรียบเทียบผลแบบทางเดียว (One-Way FSI) และแบบสองทาง (Two-Way FSI) ความดันสูงสุด (Maximum Pressure) และการเสียรูปที่ปลายสูงสุด (Maximum tip deflection) ของแบบสองทางมีค่า 7.7 เมตร และแบบทางเดียว 6.9 เมตร เพราะการวิเคราะห์แบบสองทางเอาการเสียรูปมาคำนวณใหม่และพลังงานที่ผลิตได้แบบสองทางมีค่า 53.6 เมกะวัตต์ และแบบทางเดียว 51.7 เมกะวัตต์

งานวิจัยสองที่ทำการอ้างอิง [2] ได้ทำใบพัดกังหันลมแนวนอนขนาด 1.5 เมกะวัตต์ ที่มีความยาว 33.25 เมตร วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (Fluid-Structure Interaction) ภายใต้ภาระกรรมที่ประมาณมาจาก

ความเร็วลม 8-24 เมตรต่อวินาที พิจารณาเพียง 1 ใบพัด ได้ทำการวิเคราะห์การเสียรูปที่ปลายสูงสุด (Maximum tip deflection) เกิดขึ้นที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที และความเครียดสูงสุด (Maximum stress) เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมระหว่างแกนใบพัดกับผิวใบพัดบริเวณโคนใบพัด

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยมีดังนี้

- 1) วิเคราะห์การเสียรูปของใบพัดกังหันลมด้วยวิธีปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง
- 2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพัดโดยการคำนวณด้วยวิธีปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบทางเดียว (One-Way FSI) กับแบบสองทาง (Two-Way FSI)

2. อุปกรณ์และวิธีการ



2.1 อุปกรณ์

2.1.1 โปรแกรมที่ใช้

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบสองทาง (Two-Way FSI) ใช้วิธีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบสองทางอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Ansys เป็นซอฟต์แวร์ในการดำเนินการ เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่รองรับการใช้งานของวิธีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง ทำให้มีการส่งข้อมูลไประหว่าง CFD และ FEA อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะใช้โปรแกรมย่อยของ Ansys ที่ชื่อว่า Ansys Fluent ในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและใช้ Ansys Static Structure ในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1.2 ข้อมูลใบพัดกังหันลม

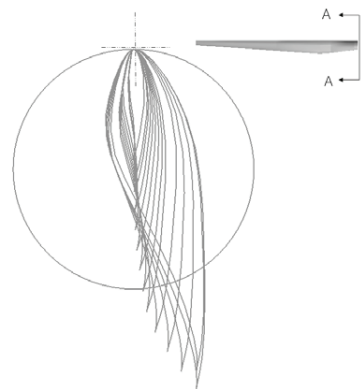
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใบพัดกังหันลมชนิด WindPACT 1.5 MW และอ้างอิงข้อมูลขนาดใบพัดจากงานวิจัยของ [3] และปรับปรุงใบพัดโดย [2] ซึ่ง

เป็นงานวิจัยที่มีการหาโหลดที่กระทำบนใบพัดกังหันลม ที่ความเร็วลม 8-24 เมตรต่อวินาที ดังตารางที่ 2 โดยความยาวของใบพัด 33.25 เมตร ได้ถูกจำลองขึ้น ผ่านโปรแกรมเขียนแบบ 3 มิติ โดยข้อมูลแพนอากาศ ที่ใช้ในการจำลองใบพัดมีด้วยกัน 3 ชนิด กระจาย ไปตามยาวของใบพัด ได้แก่ ช่วงโคน (Inboard) ใช้แพนอากาศชนิด S818, ช่วงกลาง (Mid-span) ใช้แพนอากาศชนิด S825 และช่วงปลาย (Outboard) ใช้แพนอากาศชนิด S826 โดยข้อมูลขนาด ตำแหน่ง และมุมบิดของแพนอากาศ ดังตารางที่ 1 ส่วนแกน ใบพัดเป็นแบบ box beam ในลักษณะการใส่แกน แบบตรง แสดงดังรูปที่ 4

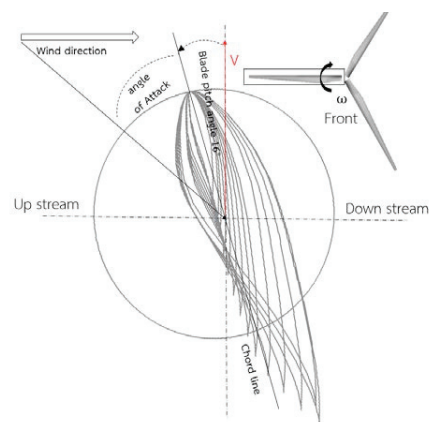
ตารางที่ 1 มุมบิดของใบพัดแต่ละตอน

Airfoil	Span (m)	Twist (degree)	Chord (m)
Root	1.75-2.45	-	1.9
S818	7.3	11.1	2.59
S818	9.51	10.41	2.74
S818	11.73	8.38	2.58
S818	13.95	6.35	2.41
S818	16.16	4.33	2.25
S825	18.38	2.85	2.08
S825	20.6	2.22	1.92
S825	22.81	1.58	1.75
S825	25.03	0.95	1.59
S825	27.25	0.53	1.43
S825	29.46	0.38	1.28
S826	31.68	0.23	1.13
S826	33.25	0	1.05
S826	35	-0.5	0.875

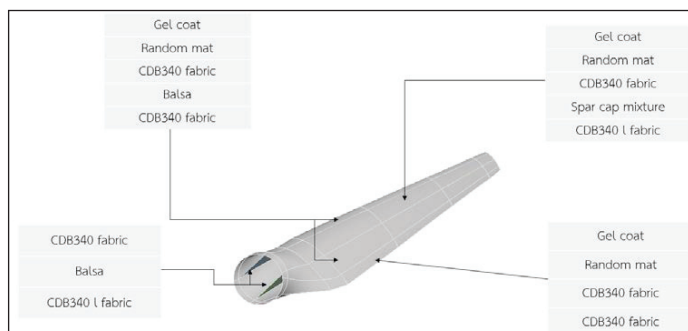
เมื่อ Span (m) หมายถึงระยะตามความยาว ของใบพัด Chord (m) หมายถึงความกว้างของ แพนอากาศในแต่ละส่วนตามความยาวของใบพัดและ Twist หมายถึงมุมบิดของแพนอากาศในแต่ละส่วน ตามความยาวของใบพัด แสดงดังรูปที่ 1 มุมพิทช์ ของใบพัด (blade pitch angle) คือมุมที่อยู่ระหว่าง แกน Chord line กับแกนอ้างอิง ใบพัดแบบ fixe pitch ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วลม ส่วนใบพัด แบบ direct pitch เปลี่ยนแปลงตามความเร็วลม ดังตารางที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2 และค่าวัสดุขนาด ความหนา แสดงดังรูปที่ 3 และตารางที่ 3-6



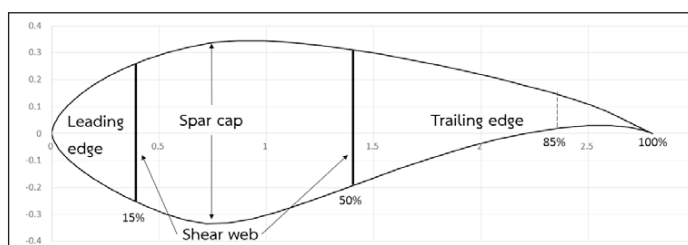
ภาพที่ 1 ทิศทางการบิดของหน้าตัดใบพัด



ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งมุมพิทช์ 16°
มองจากโคนไปปลายใบพัด



ภาพที่ 3 การเรียงตัวของชั้นวัสดุที่ใบพัด



ภาพที่ 4 แสดงตำแหน่งการวางของแกนใบพัด

ตารางที่ 2 แร้งลม 8-24 เมตรต่อวินาที

wind speed [m/s]	Rotor rotational speed [rpm]	Blade pitch angle [deg.]
8	15	2.6
12	20.5	7.4
16	20.5	16
20	20.5	22
24	20.5	26.7

ตารางที่ 3 ความหนาของวัสดุคอมโพสิตที่โคนใบพัด

Layer	Material	Thickness[mm]
1	Gel coat	0.51
2	Random mat	0.38
3	triaxial fabric	0.89
4	Spar cap mixture	15.0
5	triaxial fabric	0.89

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของวัสดุ

Material	E_x (GPa)	E_y (GPa)	E_{xy} (GPa)	ν_{xy}	ρ (kg/m ³)
Gel coat	3.44	3.44	1.38	0.3	1230
Random mat	9.65	9.65	3.86	0.3	1670
CDB340 triaxial fabric	24.2	8.97	4.97	0.39	1700
Balsa	2.07	2.07	0.14	0.22	144
Sparcap mixture	27.1	8.35	4.7	0.37	1700

ตารางที่ 5 ความหนาของวัสดุที่แกนใบพัด

Layer	Material	Thickness [mm]
1	triaxial fabric	0.89
2	Balsa	1.0%c
3	triaxial fabric	0.89

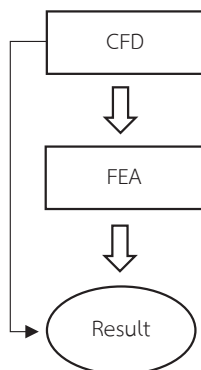
ตารางที่ 6 ความหนาของวัสดุคอมโพสิตที่ตัวใบพัด

Layer	Material	Thickness [mm]
1	Gel coat	0.51
2	Random mat	0.38
3	triaxial fabric	0.89
4	Balsa	0.5%c
0%-15%c	Spar cap mixture	8.3,6.5%c
15%-50%c	Balsa	1.0%c
50%-85%c		
5	triaxial fabric	0.89

2.2 วิธีการ

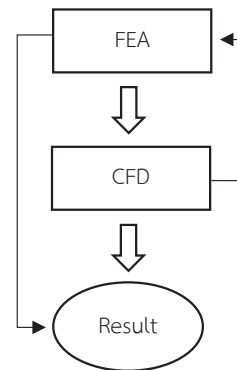
2.2.1 การแก้ปัญหาด้วยวิธีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างด้วยซอฟต์แวร์มีด้วยกัน 2 วิธี ได้แก่

1) การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบทางเดียว (One-Way FSI) เป็นการนำภาระกรรมทางกลหรือทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์ของไหล มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างนั้นๆ เพียงทางเดียว นั่นหมายถึงจะไม่มี การปรับปรุงข้อมูลการเสีรูปของโครงสร้างแล้วส่ง กลับไปคำนวณพลศาสตร์ของไหล แสดงดังรูปที่ 5



ภาพที่ 5 แบบทางเดียว (One-Way FSI)

2) การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบสองทาง (Two-Way FSI) เป็นการนำ ข้อมูลการเสีรูปของโครงสร้างที่ปรับปรุงแล้วจะถูก ส่งไปคำนวณภาระกรรมทางกลหรือทางความร้อนจาก การคำนวณพลศาสตร์ของไหล แล้วนำกลับมาวิเคราะห์ โครงสร้างนั้นๆ เป็นเช่นนี้กลับๆไปกลับมา การเสีรูปของ โครงสร้างที่ได้จะถูกปรับปรุงอยู่เรื่อยๆ จนเข้าสู่สมดุล แสดงดังรูปที่ 6



ภาพที่ 6 แบบสองทาง (Two-Way FSI)

2.2.2 ลักษณะสภาพการไหลแบ่งได้ สองชนิด คือ steady state flow คือการไหล ของของไหลที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และ transient flow คือการไหลของของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนค่าเลข เรย์โนลด์ (Reynold number) เป็นค่าที่บอกถึง ลักษณะการไหลของของไหลที่ความเร็วต่ำ ชั้นของไหล จะราบเรียบเรียกรวมการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบ ราบเรียบ (Laminar Flow) เมื่อความเร็วมากขึ้น การไหลจะไม่เป็นระเบียบ รูปแบบของการไหลนี้ เรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) เราสามารถคำนวณค่าเลขเรย์โนลด์ได้จากสมการที่ 1

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

เมื่อ Re คือ เลขเรย์โนลด์

V คือ ความเร็วการไหล m/s

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล kg/m^3

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ m

μ คือ ความหนืดของของไหล $kg/m.s$

2.2.3 การแก้ปัญหาค่าที่บอกถึงความ

ถูกต้องของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) คือ $Y+$ ค่าที่บอกถึงขนาดของชั้นขีตฉิวนระหว่างใบพัดกับโดเมนเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย แสดงดังสมการที่ 2

$$Y+ = \frac{\rho \mu_\tau h}{\mu} \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

μ_τ คือ ความเร็วเสียดทานของอากาศ

h คือ ความสูงเมฆของชั้นขีตฉิวน

μ คือ ความหนืดพลวัต

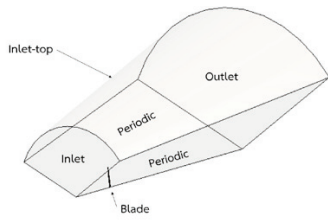
2.2.4 วัสดุคอมโพสิต (Composite

Materials)

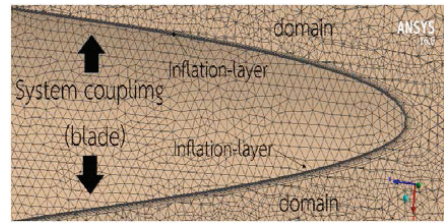
เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของใบพัดกังหันลมที่ทำจากวัสดุคอมโพสิตแบบอัดซ้อน ซึ่งเป็นวัสดุที่เกิดจากการนำวัสดุคอมโพสิตแผ่นบาง (Lamina Composite) ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่เรียงตัวขนานกัน (Unidirectional, UD) ทำให้มีคุณสมบัติทางกลแบบออร์โธทรอปิก (Orthotropic) คือมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแกน X , Y และ Z แล้วนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันจนเป็นโครงสร้างที่ต้องการ ซึ่งการปรับมุมเส้นใยในการซ้อนกันของวัสดุคอมโพสิตแผ่นบางในแต่ละชั้น สามารถทำให้คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตมีความแตกต่างกันได้ เช่น การอ่อนการบิด ความแข็งแรงถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในประสิทธิภาพของใบพัด

2.3 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

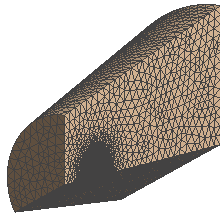
งานวิจัยนี้ใช้ขนาดของโดเมนเป็น 1 ใน 3 ของทรงกระบอก โดยศูนย์กลางการหมุนแบบสมมาตรของ 3 ใบพัด พิจารณาเพียง 1 ใบพัด 120 องศา ขนาดโดเมนทางเข้ามีรัศมี 120 เมตร ห่างจากใบพัดไปทางด้านหน้า 90 เมตร ส่วนทางออกมีรัศมี 240 เมตร ห่างจากใบพัดไปทางด้านหลัง 350 เมตร แสดงดังรูปที่ 7 เนื่องจากการไหลของใบพัดกังหันลมซึ่งมีค่าเลขเรย์โนลด์สูง จึงเป็นแบบการไหลที่ไม่เป็นระเบียบ เรียกการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Model) เนื่องจากฉิวนระหว่างโดเมนกับใบพัดเป็นในลักษณะแบบชั้น จึงทำการเลือกใช้ SST k-Omega [4] และชั้นระหว่างผิวใบพัดกับโดเมนกำหนดให้มี 20 ชั้น มีอัตราการใช้ 1.35 มีเมชชั้นแรก 0.000009 เมตร เพื่อได้ค่า $Y+$ ที่ประมาณ 1 รอบๆ ผิวใบพัดค่าที่แนะนำควรอยู่ประมาณ 1 ซึ่งเป็นค่าที่ดีสำหรับการวิเคราะห์ใบพัด [4] แสดงดังรูปที่ 10 การสร้างเมชซึ่งประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ทรงตันแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral element) 4 จุด (node) แสดงดังรูปที่ 8 ทำการปรับเมชให้ละเอียดยิ่งขึ้นเพื่อให้ผลของทอร์คมีความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้นจาก 2,625,178 เอลิเมนต์ เป็น 3,967,399 เอลิเมนต์ ในการศึกษาเลือก 2,625,178 เอลิเมนต์ เพราะมีจำนวนเอลิเมนต์ไม่มากเกินไป เพราะมีความแตกต่างจากจำนวนเอลิเมนต์สูงสุด 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 9 ในการคำนวณแบบสองทางได้ทำการแบ่งโซน (dynamic mesh) ด้วยฟังก์ชัน system coupling เพื่อส่งข้อมูลการเสียรูปของตัวใบ FEA กับ CFD แล้วทำการเมชใหม่ในส่วนโซน (system coupling zone) ทุกครั้งที่มีการส่งข้อมูลการเสียรูป แสดงดังรูปที่ 11 พลังงานที่ใบพัดผลิตได้คำนวณจาก $P_g = \Omega T \eta$ เมื่อ P_g คือพลังงานของใบพัด Ω คือค่าการหมุนรอบของใบพัด T คือค่าทอร์คของใบพัด η คือค่าประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน 0.925 [3]



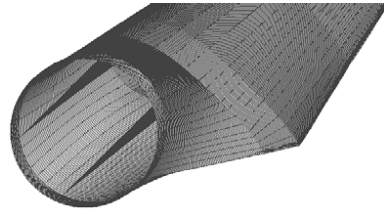
ภาพที่ 7 การกำหนดเงื่อนไขขอบโดเมน



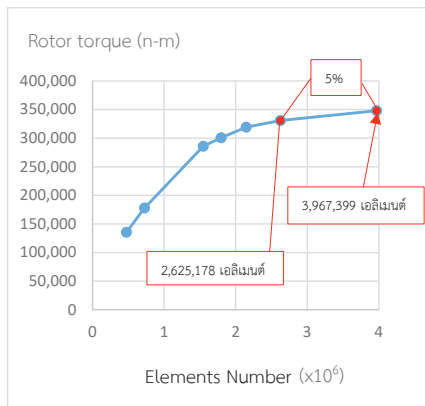
ภาพที่ 11 การแบ่งโซน system coupling



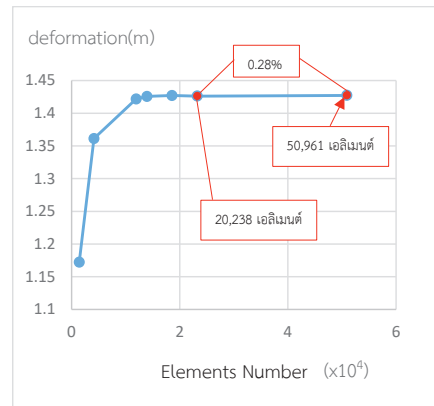
ภาพที่ 8 เอลิเมนต์ทรงตันของโดเมน



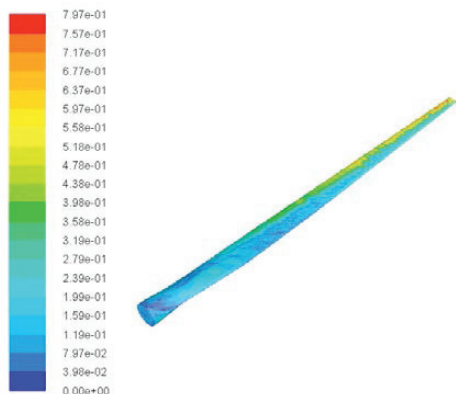
ภาพที่ 12 เอลิเมนต์แผ่นบางของใบพัด



ภาพที่ 9 การลู่เข้าของทอร์กเมื่อเพิ่มเอลิเมนต์



ภาพที่ 13 การลู่เข้าของการเสียรูปเมื่อเพิ่มเอลิเมนต์

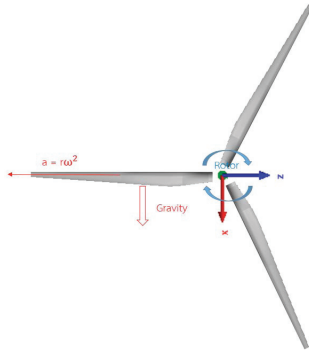


ภาพที่ 10 Blade Y+

2.4 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างเมชซึ่งประกอบไปด้วยเอลิเมนต์แผ่นบาง (plate element) มีทั้งสี่เหลี่ยมด้านเท่าและด้านไม่เท่าแบบ 4 จุด (node) แสดงดังรูปที่ 12 ทำการปรับเมชให้ละเอียดยิ่งขึ้นเพื่อให้ผลลัพธ์มีความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น จาก 20,238 เอลิเมนต์ เป็น 50,961 เอลิเมนต์ ในการศึกษาเลือก 20,238 เอลิเมนต์ เพราะมีจำนวนเอลิเมนต์ไม่มากเกินไป เพราะมีความแตกต่างจากจำนวนเอลิเมนต์สูงสุด 0.28 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการเสียรูป แสดงดังรูปที่ 13

การวิเคราะห์ใบพัดกังหันลม ทำการยึดที่โคนไม่ให้ขยับ ทำการใส่ค่าแรงเหวี่ยง แรงโน้มถ่วง และทำการใส่ไหลด์ที่คำนวณมาจากของไหล (fluid) ลงบนใบพัด การวิเคราะห์ใน FEA แสดงดังรูปที่ 14

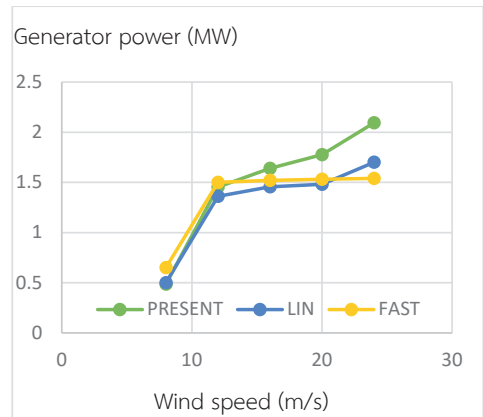


ภาพที่ 14 แสดงเงื่อนไขต่างๆ บนใบพัด

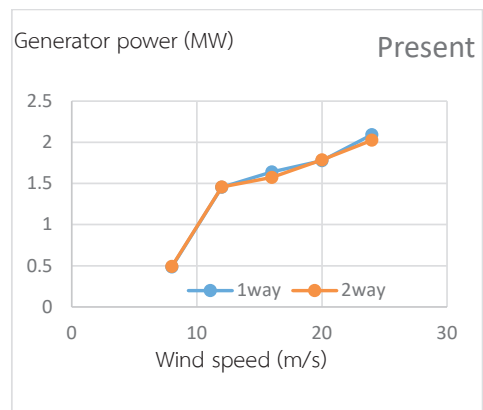
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

รูปที่ 15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการคำนวณแบบทางเดียวเมื่อ LIN คืองานวิจัยที่ใช้อ้างอิง [2] คำนวณด้วยโปรแกรม Ansys ใช้วิธีปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบทางเดียว (One-Way FSI) ส่วน FAST คือ โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลที่พัฒนาโดย NWTTC ที่สนับสนุนโดย NREL [5] และ PRESENT คืองานปัจจุบันที่ทำ การศึกษาด้วยโปรแกรม Ansys ใช้วิธีปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างแบบทางเดียว (One-Way FSI) ทุกความเร็วลม มีค่าพลังงานที่ผลิตได้ใกล้เคียงกันแตกต่างกันไม่เกิน 19 เปอร์เซ็นต์ จากงาน วิจัย [1] ที่ความเร็วสูงสุด 24 เมตร ต่อวินาที มีความแตกต่างกันมากที่สุด 18.8 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัย [1] รูปที่ 16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการคำนวณแบบทางเดียวกับแบบสองทาง ที่คำนวณได้พลังงานไม่แตกต่างกันเพราะการคำนวณแบบสองทางมีการเสียรูปน้อย ดังตารางที่ 9



ภาพที่ 15 พลังงานที่ผลิตได้ของใบพัด ขนาด 1.5 เมกะวัตต์



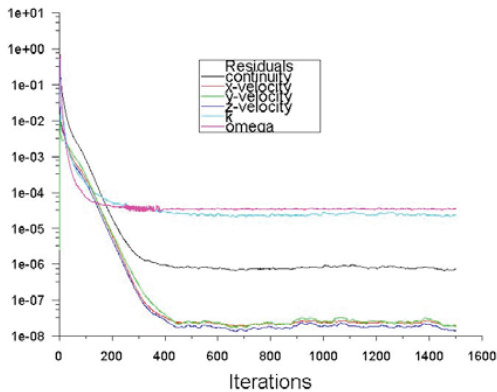
ภาพที่ 16 พลังงานที่ผลิตได้ของใบพัด ขนาด 1.5 เมกะวัตต์

มาตรฐานการลู่เข้าของ CFD

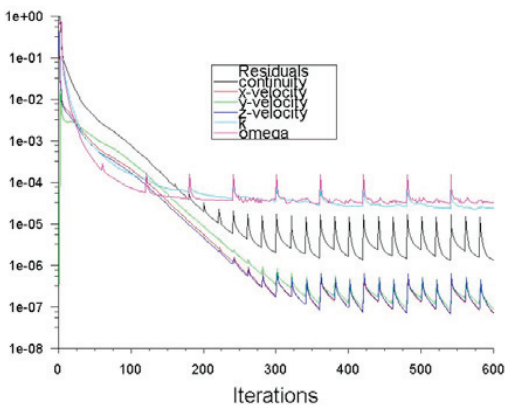
การกำหนดค่าคงค้าง (Residual values)

ค่าคงค้างมีการลู่เข้าด้วยกัน 6 ค่า คือความต่อเนื่อง (continuity), ความเร็วตามแนวแกน x, ความเร็วตามแนวแกน y, ความเร็วตามแนวแกน z, พลังงานการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent kinetic energy k), โอเมก้า (the specific dissipation rate ω) กำหนดให้ทุกตัวแปรมีค่าต่ำกว่า 10^{-4} [4] แล้วโปรแกรมจะหยุดการคำนวณ เพราะถึงแม้จะคำนวณต่อไป ผลการคำนวณจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่ในงานวิจัยนี้ยังคงคำนวณต่อไปจนครบ 1,500 รอบ

ค่าคงค้ำงลู่เข้าแบบทางเดียว (One-Way FSI) แสดงดังรูปที่ 17 และแบบสองทาง (Two-Way FSI) กำหนดให้มีการจำลอง 30 ครั้ง ครั้งละ 20 รอบ ค่าคงค้ำงจะลู่เข้า แสดงดังรูปที่ 18



ภาพที่ 17 ค่าคงค้ำงแบบทางเดียว



ภาพที่ 18 ค่าคงค้ำงแบบสองทาง

การอนุรักษ์อัตราการไหลของมวล

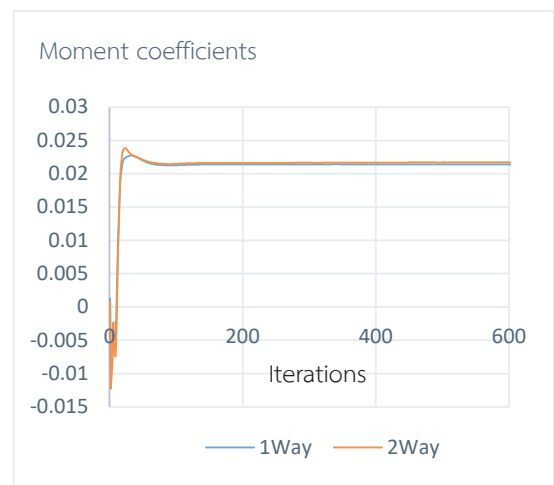
ความไม่สมดุลของฟลักซ์สุทธิ ควรน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของฟลักซ์ที่เล็กที่สุดผ่านโดเมน [4] ดังตารางที่ 7 ซึ่งคำนวณแบบทางเดียวมีฟลักซ์สุทธิ 0.00145238 กิโลกรัมต่อวินาที คิดเป็น 9.9×10^{-7} เปอร์เซ็นต์ของโดเมน Inlet 147,358.84 กิโลกรัมต่อวินาที และแบบสองทางมีฟลักซ์สุทธิ 0.02090172 กิโลกรัมต่อวินาที คิดเป็น 1.42×10^{-7} เปอร์เซ็นต์ของโดเมน Inlet 147,358.84 กิโลกรัมต่อวินาที

ตารางที่ 7 ความสมดุลมวลของสองโมเดล

Sub-Domain	Mass Flow Rate (kg/s)	
	One-Way FSI	Two-Way FSI
Inlet	147,358.84	147,358.84
Inlet-top	443,313.65	443,313.65
Outlet	-590,672.49	-590,672.51
Net	-0.00145238	-0.02090172

สัมประสิทธิ์โมเมนต์รอบแกนหมุน (Moment coefficients : Cm)

สัมประสิทธิ์โมเมนต์รอบแกนหมุนคือค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการหมุนของใบพัดรอบแกน เริ่มคำนวณจากศูนย์ ใบพัดหยุดนิ่ง เมื่อมีแรงลมเข้าปะทะใบพัดเริ่มหมุนทำให้กราฟช่วงแรกมีความไม่แน่นอน ค่าที่นำมาคำนวณจึงต้องมีการลู่เข้า การคำนวณการลู่เข้าแบบทางเดียว (One-Way FSI) และแบบสองทาง (Two-Way FSI) แสดงดังรูปที่ 19 ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากเกิดการเลี้ยวรูปน้อย ดังตารางที่ 9



ภาพที่ 19 สัมประสิทธิ์โมเมนต์แบบทางเดียว และแบบสองทาง

3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การเปรียบเทียบงานวิจัยอ้างอิงกับการแอนรวมที่ปลายใบพัดที่คำนวณได้ ดังตารางที่ 8 ทุกความเร็วแนวโน้มใกล้เคียงกัน แตกต่างไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์สำหรับการเสียรูปในงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงที่ความเร็วลม 24 เมตรต่อวินาที มีค่าต่ำกว่าค่าอื่นๆ อย่างผิดสังเกตจึงไม่นำมาเปรียบเทียบ เพราะผลอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ตารางที่ 9 %Ratio คืออัตราส่วนการแอนรวมที่ปลายใบพัดต่อความยาวใบพัด 35 เมตร การคำนวณยังมีค่ามากยิ่งขึ้นเสียรูปมาก เปรียบเทียบแบบทางเดียวกับแบบสองทาง พบว่าอัตราส่วนใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 8 การแอนรวมที่ปลายใบพัด

Deformation (m)			
V(m/s)	Lin	Present	%Error
8	1.28	1.42	11.49
12	1.83	1.95	5.98
16	1.02	1.22	16.59
20	0.45	0.42	5.33
24	0.05	0.38	87.14

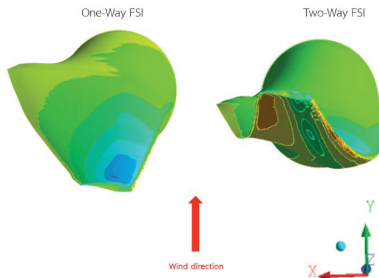
ตารางที่ 9 การแอนรวมที่ปลายใบพัดต่อความยาวใบพัด

Deformation (m)				
V (m/s)	1Way FSI	%Ratio	2Way FSI	%Ratio
8	1.42	4.07	1.43	4.1
12	1.95	5.57	1.95	5.59
16	1.22	3.5	1.2	3.42
20	0.42	1.21	0.42	1.20
24	0.38	1.08	0.39	1.11

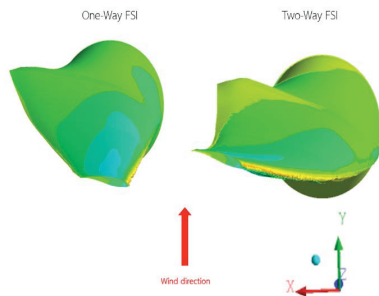
3.3 ผลการทดสอบและประเมินผลการทำงาน

จากการจำลองและประเมินผลพลังงานที่ใบพัดผลิตได้ด้วยวิธีการแบบทางเดียวและแบบสองทางไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 16 เนื่องจากใบพัดเกิดการแอ่นตัวน้อย ทำให้ใบพัดเกิดการปะทะลมไม่ต่างจากของเดิม แต่กรณีที่ใบพัดมีการเสียรูปมากๆ เกิดการแอ่นตัวมากๆ ที่ต่างจากใบพัดเดิม ผลการวิเคราะห์ของ 2 วิธี ได้แตกต่างกัน จึงทำการทดสอบด้วยการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัส (modulus: E_x , E_y) ของเนื้อวัสดุลง 3 เท่า เพื่อให้ใบพัดอ่อนลง มีคุณสมบัติการแอ่น โดยที่ทุกวัสดุ ตารางที่ 3 ยกเว้น Gel coat ที่คงเดิม พิจารณาที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที และ 16 เมตรต่อวินาที โดยมีมุมพิทช์ 7.4 และ 16 องศา ตามลำดับ และอัตราหมุน 20.4 รอบต่อวินาที หลังจากได้ทำการทดสอบพลังงานที่ใบพัดผลิตได้ด้วยวิธีการแบบทางเดียวซึ่งคำนวณการผลิตไฟฟ้าโดยไม่คิดการแอ่น ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที พบว่าผลิตพลังงานได้เป็น 1.45 เมกะวัตต์ และลม 16 เมตรต่อวินาที ผลิตพลังงานได้เป็น 1.64 เมกะวัตต์ และแบบสองทางนำการแอ่นของใบพัดมาคำนวณการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที พบว่าผลิตพลังงานได้เป็น 1.54 เมกะวัตต์ และลม 16 เมตรต่อวินาที ผลิตพลังงานได้เป็น 1.57 เมกะวัตต์ พบว่าถ้าเกิดการแอ่นจะทำนายแบบทางเดียวและแบบสองทางได้ต่างกันในการผลิตกระแส ไฟฟ้า ซึ่งที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที ผลิตพลังงานได้เพิ่มขึ้น 6.2 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการแอ่นตัวที่ปลายของแบบสองทางแอ่นตัวไปด้านหลังระนาบการหมุนของใบพัดมีระยะ 5 เมตร ทำให้เกิดแรงผลักแรงบิดมากกว่าแบบทางเดียว ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยที่ [1] ส่วนความเร็วลม 16 เมตรต่อวินาที ผลิตพลังงานได้ลดลง 4.27 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการแอ่นตัวที่ปลายของแบบสองทางเกิดการแอ่นไม่เท่าลม 12 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีระยะ 1.9 เมตร แต่ใบพัดมีการแอ่นตัวใบพัดไปทิศทางแกน x ของใบพัดที่มาก มีระยะ

2.7056 เมตร ซึ่งเกิดจากมุมพิทช์ที่มีค่า 16 องศา ทำให้แรงดึงดูดของโลกกระทำที่ใบพัดในทิศทางแกน x ได้มากกว่าลม 12 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีมุมพิทช์ 7.4 องศา และมีระยะ 1.915 เมตร แสดงดังรูปที่ 20-21



ภาพที่ 20 การแอนที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 21 การแอนที่ความเร็วลม 16 เมตรต่อวินาที

4. สรุป



ในการทำงานของใบพัดกังหันลม (WindPact 1.5 MW) การคำนวณแบบทางเดียวและแบบสองทางทำนายผลการผลิตพลังงานไม่ต่างกัน แต่ในกรณีที่ใบพัดมีการแอนและการบิด ผลการวิเคราะห์ของ 2 วิธีได้แตกต่างกัน ผู้วิจัยมีความเชื่อว่าการคำนวณ

แบบสองทางให้ผลที่แม่นยำกว่าเพราะได้นำโครงสร้างที่มีการเสยรฐระหว่างการทำงานมาคิดด้วย จะเห็นได้ว่าลักษณะการคำนวณแบบสองทาง ให้พลังงานที่มากกว่าแบบทางเดียวที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาทีเนื่องจากใบพัดแอนตัวไปด้านหลัง ระบายการหมุนของใบพัดมีระยะ 5 เมตร และการคำนวณแบบสองทาง ให้พลังงานที่ลดลงจากแบบทางเดียวที่ความเร็วลม 16 เมตรต่อวินาที เนื่องจากมุมพิทช์ที่มีค่า 16 องศา ทำให้แรงดึงดูดของโลกกระทำที่ใบพัดในทิศทางแกน x ได้มากกว่าลม 12 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีมุมพิทช์ 7.4 องศา

5. เอกสารอ้างอิง



- [1] Yeta Hu and Huachun Wu (2017). Composite Study on Uni- and Bi-Direction Fluid Structure coupling of Wind Turbine Blades. Woldia University.
- [2] Lin Wang, Robin Quant, and Athanasios Kolios (2016). Fluid structure interaction modelling of orizontal-axis wind turbine blades based on CFD and FEA. Cranfield University.
- [3] Griffin (2001). WindPACT Turbine Design Scaling Studies Technical Area1-Composite Blades for 80-120 Meter Rotor. Energy Laboratory Operated by Midwest Research.
- [4] Ansys, A. (2013). Version 16.0; ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA, USA November, 2013.