ค ง ง ช ชคช ช ชง

Structural Analysis of Rotating Wind Turbines with Computational Fluid Dynamics.

- ช
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: thara.ta@ku.th*

ง

ในปัจจุบันพลังงานทางเลือกได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มมากขึ้นและจากแนวโน้มการใช้พลังงานทางเลือกของโลกพบว่าลมเป็นแหล่งพลังงานที่มีความนิยมอันดับต้นๆ และ ยังคงมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้การศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างกังหันลมนั้นมีความน่าสนใจ ในงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์แรงจากกระแสลมที่กระทำต่อตัวกังหันขนาด 5 MW ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมผลิตพลังงานไฟฟ้า พิจารณาสภาวะที่กังหันลมสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุดที่ความเร็วลม 11.4 เมตรต่อวินาที ณ รอบความเร็วการหมุนกังหัน 12 รอบต่อนาที โดยในการวิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองโครงสร้างที่มีความละเอียดสูงโดยพิจารณาการหมุนของใบพัดกังหันไปพร้อมกันซึ่งจะมีความละเอียดถูกต้องมากยิ่งขึ้นในเชิงพฤติกรรม ซึ่งผลของแรงลมที่เกิดจากการไหลผ่านของอากาศกระทำต่อแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Computational Fluid Dynamics (CFD) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำผลของแรงลมที่ได้จากการวิเคราะห์ในขั้นต้นมาวิเคราะห์โครงสร้างเสากังหันที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมลมที่ความหนาเหล็กที่แตกต่างกันโดยใช้แบบจำลองอย่างง่าย (Simplified structural model) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างเสากังหันที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีความแข็งแรงเพียงพอภายใต้เงื่อนไขแรงลมดังกล่าว

คำสำคัญ: กังหันลม, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, เสากังหันลม

Abstract

Nowadays, alternative energy plays an increasing role in human daily life. Wind is one of the most popular energy sources and continues to grow in industry. For this reason, the study of wind turbine structure is interesting. This research analyzes the wind forces applied to a 5 MW turbine, which widely used in the electric power industry. For wind analysis, the condition that the wind turbine can generate maximum electricity at wind speed 11.4 m/s was applied at the same time with rotating turbine at a speed of 12 rpm. There are two parts in this research. Firstly, the simulation and model calibration, a model with concurrent rotating turbine blades was used, which would be behaviorally more accurate, to determine the aerodynamic wind forces acting on the structure evaluated using Computational Fluid Dynamics (CFD). The results obtained from the analysis were found close to previous studies. Next, the obtained results of wind forces were applied to the structure of turbine tower based on a simple structural model to study effect of steel thickness to structural responses under AISC 360-10 provision. It was found that the turbine tower was strong enough under such wind conditions.

Keywords: Wind Turbine, Computational Fluid Dynamics, Tower

1. ง

เนื่องด้วยโครงสร้างกังหันลมมีลักษณะทางกายภาพที่มีความชะลูดของตัวเสาและมวลของกังหันที่อยู่บริเวณปลายด้านบนเสากังหันมีค่ามากประกอบกับแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างมีลักษณะแรงแบบพลศาสตร์ (Dynamics Load) ซึ่งเกิดจากการไหลของอากาศ (Aerodynamic Load) ที่มีขนาดของแรงกระทำเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา มีความเป็นไปได้ที่โครงสร้างอาจเกิดการตอบสนองต่อแรงลมที่กระทำสูงกว่าปกติ อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยพฤติกรรมการไหลของอากาศมีความซับซ้อนและไม่แน่นอนสูง ทำให้การวิเคราะห์แรงลมที่กระทำต่อกังหันลมทำได้ยาก ซึ่งในอดีตมักต้องอาศัยการวิเคราะห์จากการจำลองโครงสร้างกังหันขนาดเล็กเพื่อใช้ทดสอบในอุโมงค์ลมซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ยุ่งยากอีกทั้งมีค่าใช้จ่ายที่สูง แต่ในปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีการวิเคราะห์ของไหลเชิงคำนวณ Computational Fluid Dynamics (CFD) ให้สามารถวิเคราะห์แรงลมที่กระทำต่อกังหันลมจากการจำลองโครงสร้างกังหันลมตามขนาดจริงได้ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะในด้านการศึกษาผลตอบสนองของโครงสร้างที่เกิดจากแรงลมในแรูปแบบต่างๆ

จากการศึกษาการวิบัติของเสากังหันลมพบว่าส่วนมากเกิดจากการรับน้ำหนักที่มากเกินกำลังของโครงสร้าง ความล้า และ การถูกทำลายเนื่องจากพายุ [1] ด้วยเหตุนี้เองการตรวจสอบกำลังของเสากังหันลมขณะใช้งานจึงมีความสำคัญ โดยจากงานวิจัยของห้องปฏิบัติพลังงานทดแทนการแห่งชาติในประเทศสหรัฐอเมริกา (NREL) [2] ซึ่งเป็นองค์กรที่ทำงานด้านพลังงานทางเลือกได้ทำการศึกษาแรงลมที่กระทำต่อกังหันลมขนาด 5 MW ที่ถูกนำมาใช้ในหลายประเทศด้วยวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) นอกจากนี้งานวิจัยในอดีต Song [3] และ Nyoman [4] ทำให้เห็นว่าการวิเคราะห์กังหันลมขนาด 5

MN ด้วยวิธี CFD โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ KW-SST ให้ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ที่มีละเอียดความแม่นยำเป็นอย่างดี ดังนั้นในขั้นแรกของงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเสากังหันลมที่มีการตอบสนองจากแรงลมในสภาวะที่ เกิดแรงกระทำต่อกังหัน (Thrust Force) มากที่ สุดด้วยด้วยวิธี CFD โดยใช้แบบจำลองความปั่ นป่วนแบบ KW-SST เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงลมที่กระทำกับตัวกังหันลมบริเวณตำแหน่งใบพัดที่อยู่ปลายเสาและตำแหน่งศูนย์กลางมวลของเสากังหัน จากนั้นจึงพิจารณาความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ในส่วนนี้ด้วยการเปรียบเทียบกับงานวิจัยจากสถาบันและงานวิจัยในอดีตดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

ค่าแรงลมที่คำนวณได้จากแบบจำลองในข้างต้นสามารถนำมาวิเคราะห์หาผลการตอบสนองของโครงสร้างที่สนใจได้ โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นการศึกษาว่าโครงสร้างเสากังหันลมเหล็กที่มีความหนาของท่อเสาในรูปแบบที่แตกต่างกัน เนื่องจากขนาดของกังหันลมสามารถเปลี่ยนแปลงได้หากพื้นที่ติดตั้งของกันหันลมหากมีความเสี่ยงในการเกิดภัยพิบัติแบบอื่นๆร่วมด้วย เช่น การเกิดแผ่นดินไหว เป็นต้น ซึ่งเมื่อขนาดของโครงสร้างเปลี่ยนไปผลการตอบสนองของโครงสร้างย่อมเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาส่วนนี้จึงได้ทำการตรวจสอบขีดความสามารถในการรับแรงของแต่ละรูปแบบความหนาเหล็กเสาโครงสร้าง ซึ่งจะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์แรงกระทำจากลมด้วยการใช้ CFD และการตรวจสอบอัตราส่วนการออกแบบของโครงสร้างเสากังหันลม โดยอ้างอิงการออกแบบที่สภาวะประลัยตามมาตรฐาน AISC 360-10 [5] ซึ่งจะอธิบายวิธีการดำเนินงานแต่ละส่วนอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

2. ชคช

ลักษณะทางกายภาพของกังหันลมมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับความเร็วลมในพื้นที่และกำลังผลิตไฟฟ้าที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วกังหันลมขนาดใหญ่จะมีขีดความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าขนาดเล็ก ในงานวิจัยนี้ได้เลือกกังหันลมขนาด 5MW มีลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งขนาดดังกล่าวเป็นขนาดที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางโดยที่ลักษณะทางกายภาพของกังหันลมแสดงดังตารางที่ 1 อ้างอิงข้อมูลจาก NREL และจากข้อมูลทางกายภาพของกังหันลม ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองกังหันลมในรูปแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS Fluent เวอร์ชั่น 19.2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ CFD สำหรับหาแรงลมที่กระทำบนโครงสร้างกังหันลม จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเสากังหันลมในรูปแบบ 1 มิติ ด้วยโปรแกรม SAP2000 เพื่อนำแรงลมที่ได้จากการการวิเคราะห์ 3 มิติในข้างต้นมากระทำต่อโครงสร้างเสากังหันลมเหล็กที่มีความหนาของท่อเสาที่ขนาดแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบและศึกษาขีดจำกัดความสามารถในการรับการรับกำลังของโครงสร้างภายใต้มาตรฐานการออกแบบ AISC 360-10 ด้วยวิธี load and resistance factored design (LRFD)

4 ลักษณะทางกายภาพของกังหันลม

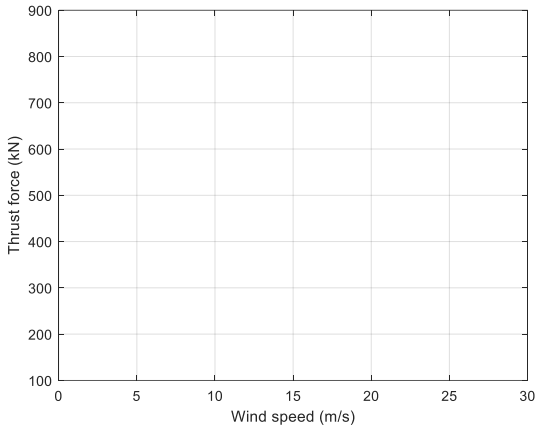
ช 4 สรุปลักษณะและคุณสมบัติเชิงกลของกังหันลม ขนาด 5 MW

ลักษณะและคุณสมบัติ	รายละเอียด
ขนาดกำลังผลิตของกังหันลม	5 MW
รูปแบบกังหันลม	Upwind, 3 ใบพัด
เส้นผ่านศูนย์กลางกังหัน, ชุดยึดประกอบใบ	126 เมตร, 3 เมตร
ความสูง พื้น-ศูนย์กลางกังหัน	90 เมตร
ความเร็วลม Cut-In, Rated	3 เมตร/วินาที, 11.4 เมตร/วินาที
อัตราเร็วเชิงมุม Cut-In, Rated	6.9 rpm, 12.1 rpm
ความเร็วปลายกังหัน Rated	80 เมตร/วินาที

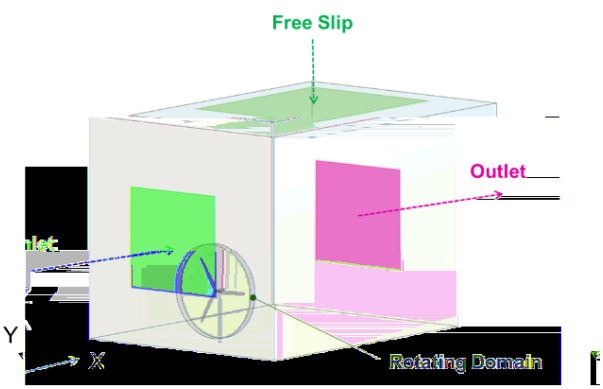
2.1 แบบจำลองการไหลของอากาศและขอบเขตของปัญหาในการวิเคราะห์ CFD

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษากังหันลมโดยใบแบบจำลอง $k\omega - SST$ ซึ่งเป็นการจำลองการไหลของอากาศในสภาวะที่มีความปั่นป่วนได้ดี ด้วยการนำข้อดีของแบบจำลองชนิด

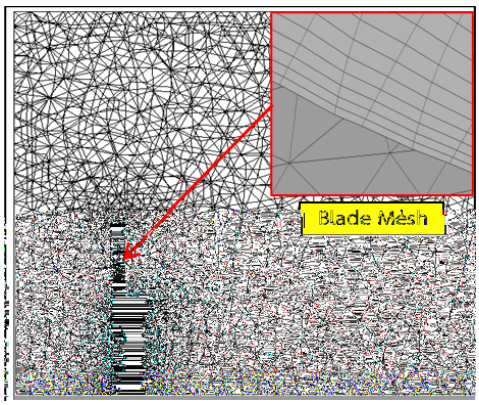
บริเวณอื่น และเนื่องจากพฤติกรรมการไหลของอากาศในบริเวณดังกล่าวจะเข้าสู่ภาวะการไหลแบบหนืด โดยที่แบบจำลองในการวิเคราะห์ CFD จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ 1 ส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโครงข่ายตาข่าย (Stationary Mesh) ของเอลิเมนต์อากาศและ 2 บริเวณเอลิเมนต์รอบใบพัดของกังหันที่เคลื่อนที่โดยถูกกำหนดให้หมุนเท่ากับความเร็วเชิงมุมของกังหันลม(Moving Mesh) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ CFD แสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ



5 ขนาดของแรงลมที่กระทำต่อกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ



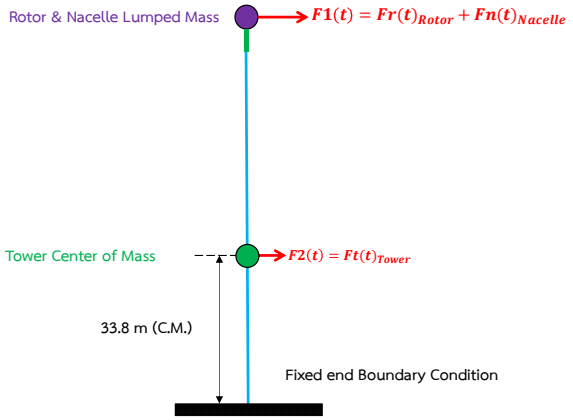
6 เงื่อนไขขอบเขตการไหลและโดเมนของแบบจำลองในการวิเคราะห์ CFD



7 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองในในการวิเคราะห์ CFD

2.2 แบบจำลองโครงสร้างเสากังหันลมด้วยโปรแกรม SAP2000

การจำลองโครงสร้างเสากังหันลมเหล็กใช้เอลิเมนต์แบบเฟรมโดยกำหนดให้เป็นเสายื่นจากพื้นดิน มีจุดรองรับที่พื้นดินเป็นแบบยึดแน่น (Fixed support) เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างเสากังหันลมโดยใช้ค่าแรงลมที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD ที่ตำแหน่งยอดเสากังหันลมและที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของเสากังหันลม ดังแสดงรูปแบบจำลองโครงสร้างในรูปที่ 5



8 ตำแหน่งที่แรงลมกระทำต่อโครงสร้าง

ค่าแรงลมที่กระทำต่อตัวเสากังหันลมเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD โดยมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นในการวิเคราะห์โครงสร้างเสากังหันลมจะใช้การวิเคราะห์แบบเชิงเส้นด้วยวิธีแยกโหมด (Mode Super Position Analysis) ภายใต้สมมุติฐานว่ามีการเสียรูปน้อย และใช้วิธี Nonlinear Direction Integration สำหรับการวิเคราะห์ที่คำนึงถึงผลของ P-Delta effect คุณสมบัติทางโครงสร้างของแบบจำลองกังหันลมแสดงดังตารางที่ 2

ช 2 คุณสมบัติทางโครงสร้างของแบบจำลองเสากังหันลม

ง ช ง ช ช		
เส้นผ่านศูนย์กลางเสาด้านบน (tower diameter at top)	3.87	เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางเสาด้านล่าง (tower diameter at bottom)	6	เมตร
ความสูงเสา (tower height)	87.6	เมตร
มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (Elastic Modulus)	200000	เมกะปาสคาล
ความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress)	344.7	เมกะปาสคาล
ความเค้น ณ จุดประลัย (Ultimate stress)	448	เมกะปาสคาล
อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio)	1	%

3. ค ง ค ช ช ช

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ CFD โดยอ้างอิงผลจากผลของงานวิจัยในอดีต โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการตรวจสอบดังต่อไปนี้

3.1 ขนาดของแรงลมที่กระทำต่อกังหันลมที่สภาวะการไหลคงตัว

การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง CFD ทำได้โดยตรวจสอบองค์ประกอบของแรงในแนวแกน X ที่กระทำต่อตัวกังหันลมในสภาวะการไหลคงตัว (Steady Thrust Force) ด้วยสมมุติฐานว่าใบพัดกังหันลมไม่มีการเสียรูป จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าแรงลมพบว่ามีขนาดของแรง Steady Thrust Force เท่ากับ 793 kN ใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นในอดีต [2] และ [8-10] ที่พิจารณาภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 4% ซึ่งถือว่ายอมรับได้ เนื่องจาก กังหันลมเป็นโครงสร้างที่เกิดการสั่นไหวได้ง่ายเนื่องจากความยาวของชิ้นส่วนโครงสร้าง รวมถึงแรงกระทำที่เกิดจาก สภาพอากาศพลศาสตร์ Aerodynamic ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุที่กระแสลมไหลผ่าน ดังนั้นผลการวิเคราะห์ค่าแรงลมที่กระทำจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยและสมมุติฐานของปัญหา ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่คิดการเสียรูปของใบพัดประกอบในการวิเคราะห์ด้วย จะทำให้ค่าแรงลมที่กระทำต่อกังหันมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.26% [8] เป็นต้น

ช 3 ผลเปรียบเทียบค่าแรงลมที่กระทำต่อกังหันลมที่สภาวะคงตัว

ผลงานวิจัยอ้างอิง	แรงกระทำต่อกังหัน (Thrust Force)	ความผิดพลาดสัมพันธ์ (Relative Error)
J. Jonkman et al (2009) [2]	817.0 kN	3.03%
B. Dose (2018) [8]	761.7 kN	-3.95%
Y. Li et al (2015) [9]	760.0 kN	-4.16%
Imiela et al. (2015) [10]	780.0 kN	-1.64%
ผลจากการวิเคราะห์ในงานวิจัย	793.0 kN	-

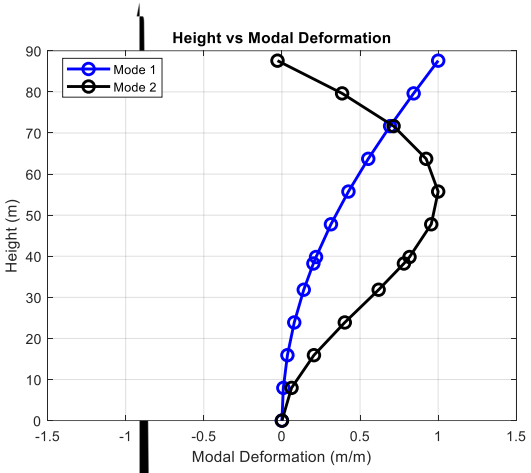
3.2 คุณสมบัติด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง

จากผลการวิเคราะห์ Modal analysis ของแบบจำลองโครงสร้าง สามารถทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์โครงสร้างกับผลของงานวิจัยในอดีตจากรูปแบบการสั่นของโครงสร้างในโหมดการสั่นไหวหลัก โดยในงานวิจัยนี้พิจารณาการสั่นไหวหลักใน 2 โหมดแรกแสดงดังรูปที่ 6 และค่าความถี่ธรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ในการวิเคราะห์โครงสร้างได้ใช้จำนวนโหมดทั้งหมด 20 โหมด ซึ่งพบว่ามีค่า Mass Participation Factor, MPF ของทั้งระบบในแต่ละทิศทางมีค่ามากกว่า 90%

ช 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง

โหมดการสั่น	J. Jonkman et al (2009) [2]	งานวิจัยนี้	ความผิดพลาดสัมพันธ์ (Relative Error)
โหมดที่ 1 SS	0.312 Hz	0.317 Hz	1.43%
โหมดที่ 1 FA	0.325 Hz	0.316 Hz	-2.68%
โหมดที่ 2 SS	2.930 Hz	2.924 Hz	-0.19%
โหมดที่ 2 FA	2.936 Hz	2.923 Hz	-0.45%

SS = Side-Side (Cross Wind), FA = Fore-Air (Along wind)



9 โหมดการสั่นไหวหลักของโครงสร้าง

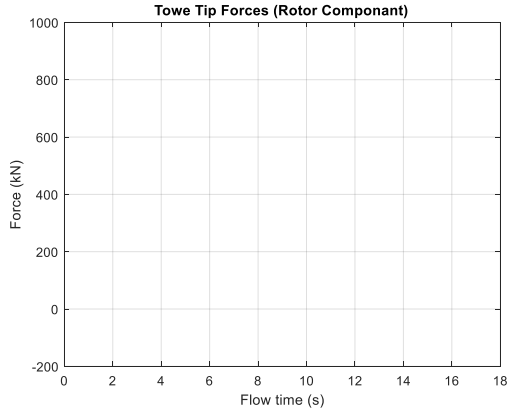
4. ค ง ำ ง ช ชค ค คช

จากการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างในหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า แรงลมที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD และคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ของโครงสร้างมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับนำไปใช้ต่อในการวิเคราะห์โครงสร้างของเสากังหันลมโดยมีรายละเอียดดังนี้

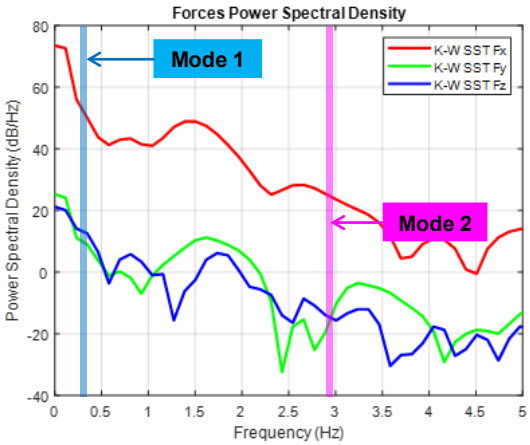
4.1 ผลการวิเคราะห์แรงกระทำจากกระแสแรงลม

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง CFD ได้ผลลัพธ์ของแรงลมที่กระทำต่อตัวกังหันลมดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งมี 2 ส่วนคือ แรงที่กระทำต่อตัวกังหันลม (Rotor) และแรงที่กระทำต่อเสากังหันลม (Tower) โดยแรงส่วนใหญ่มาจากแรงที่กระทำต่อใบพัดกังหันลม โดยแรงสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงที่การไหลยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว (Transient State) และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 951 kN ซึ่งสูงกว่าแรงที่สภาวะการไหลคงตัวประมาณ 19.79%

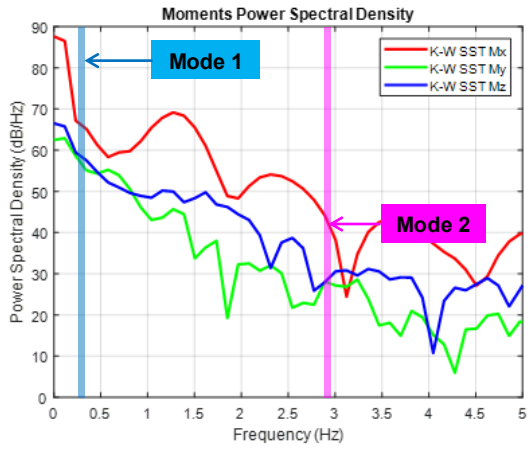
นอกจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ผลของค่าแรงลมในโดเมนความถี่ (รูปที่ 8 และรูปที่ 9) แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของแรงลมที่กระทำในช่วงความถี่ต่ำเป็นองค์ประกอบหลักสำคัญเนื่องจากมีค่าสูงและทำให้เกิดการตอบสนองของโครงสร้างสูงตามด้วยอีกทั้งมีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างด้วย



ขนาดแรงลมที่กระทำต่อตัวกังหันลม



สเปกตรัมของแรงลมในแต่ละทิศทางที่ตำแหน่งปลายเสา



สเปกตรัมของโมเมนต์กระทำที่ปลายเสา

4.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างบริเวณฐานเสากังหันลม

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาผลการศึกษาโดยอ้างอิงการรวมผลของแรงตามมาตรฐาน ASCE 7-10 [11] เพื่อการวิเคราะห์ขีดจำกัดสำหรับการออกแบบโครงสร้างเสากังหันซึ่งจะประกอบด้วยการรวมแรงหลัก 2 กรณี ดังนี้

$$ULS1 = 1.2D + 1.0W \quad (1)$$

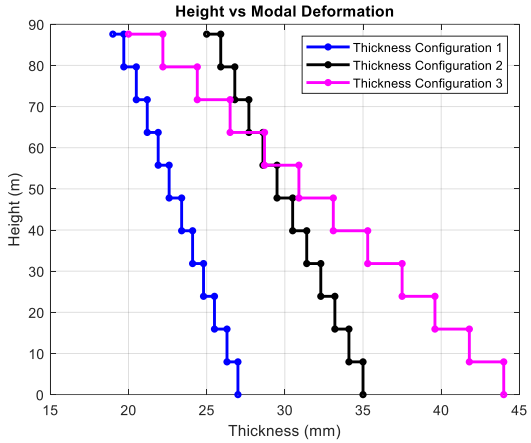
$$ULS2 = 0.9D + 1.0W \quad (2)$$

โดยที่ D คือน้ำหนักคงที่ และ W คือแรงลม

โดยในการจำลองโครงสร้างเสากังหันลมที่พิจารณาในการวิเคราะห์มีลักษณะเป็นเสาท่อเหล็กกลมที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยมีความหนาท่อแปรเปลี่ยนตามความสูงของเสา ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิจารณารูปแบบความหนาของท่อเหล็กจำนวน 3 รูปแบบ ได้แก่ C1, C2, และ C3 ตามลำดับ โดยรูปแบบ C1 คือขนาดความหนาอ้างอิงซึ่งใช้สำหรับกังหันลมขนาด 5 MN ตามที่ได้ศึกษาในงานวิจัยในอดีต [2-4] ดังแสดงในตารางที่ 5 และ รูปที่ 10

ช 8 ความหนาของเสาท่อเหล็กกลมที่ใช้ในการศึกษา

รูปแบบ	ความหนาท่อเหล็ก (ด้านบน)	ความหนาท่อเหล็ก (ด้านล่าง)
C1	19 มม.	27 มม.
C2	25 มม.	35 มม.
C3	20 มม.	40 มม.



43 ความหนาของเสาท่อเหล็กกลมตามความสูง

จากการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้าง ผู้วิจัยได้เลือกพิจารณาโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณฐานเสา โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบแยกโหมด (Modal analysis) ที่ไม่ได้พิจารณาผลของ P-Delta เปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear direct integration ที่พิจารณาร่วมผลของ P-Delta จากการศึกษาพบว่าผลกระทบของ P-Delta ส่งผลให้ค่าโมเมนต์รอบแกน Y ที่กระทำต่อฐานของเสากังหันลมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้น จะพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์แรงภายในโครงสร้างนี้สอดคล้องกันทั้งสามรูปแบบความหนาเหล็กท่อที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการพิจารณาผลของ P-Delta ในการวิเคราะห์โครงสร้างของเสากังหันลมสามารถละเว้นได้ ค่าแรงภายในโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ (ผลการวิเคราะห์ที่นำมาเปรียบเทียบนี้ พิจารณาผลของของแรงภายในที่ได้จากการรวมแรงในสมการที่ (1))

ช 9 โมเมนต์บริเวณฐานกังหันลมจากการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีต่างๆ

		โมเมนต์ในแนวแกน Y (kN-m)		
กรณีศึกษา	ชนิด	C1	C2	C3
w/o P-Delta	ค่าสูงสุด	-5213	-5058	-5013
with P-Delta		-3489	-5288	-5210
w/o P-Delta	ค่าต่ำสุด	-163691	-162418	-156879
with P-Delta		-168753	-167586	-161369

ช แรงเฉือนบริเวณฐานเสากังหันลมจากการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีต่างๆ

		แรงเฉือนในแนวแกน X (kN)		
Analysis case	Type	C1	C2	C3
w/o P-Delta	ค่าสูงสุด	166	163	156
with P-Delta		152	154	146
w/o P-Delta	ค่าต่ำสุด	-1882	-1913	-1839
with P-Delta		-1866	-1892	-1809

ใช้การวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างเสาเหล็กภายใต้ โมเมนต์กระทำแบบสองแกน (Biaxial Moment) และอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบ AISC 360-10 ด้วยวิธี LRFD ได้ผลการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างในรูปแบบของ Demand Capacity Ratio ของชิ้นส่วนที่เกิดแรงมากที่สุดในโครงสร้าง โดยในที่นี้พบว่าเกิดแรงสูงสุดขึ้นที่บริเวณฐานของกังหันลมดังแสดงค่าผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 8

ช ค่า Demand/Capacity สูงสุดในโครงสร้างจากการวิเคราะห์แต่ละกรณี

		Demand/Capacity		
Load Combination		C1	C2	C3
1.2D+1.0W	w P-Delta	0.847	0.530	0.403
1.2D+1.0W	w/o P-Delta	0.875	0.546	0.415
0.9D+1.0W	w P-Delta	0.833	0.520	0.396
0.9D+1.0W	w/o P-Delta	0.855	0.532	0.404

5. ำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ CFD เพื่อหาค่าแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างเสากังหันลมขณะที่กังหันลมหมุนตามกระแสลม พบว่าผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ค่าแรงที่เกิดขึ้นกับตัวกังหันลมมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ จากข้อมูลการวิเคราะห์ CFD ทำให้ทราบถึงรูปแบบของแรงลมที่กระทำต่อตัวโครงสร้างเสากังหันลม ซึ่งพบว่าแรงลมสูงสุดที่กระทำต่อตัวกังหันลมเกิดขึ้นในช่วงที่การไหลของกระแสลมยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัวมากกว่าแรงลมในสภาวะการไหลคงตัวประมาณ 19.79% และเมื่อนำค่าประวัติเวลาของแรงลมที่กระทำต่อตัวกังหันลมมาวิเคราะห์บนโดเมนความถี่พบว่าแรงที่กระทำส่วนมากอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ช่วยให้การออกแบบเสากังหันลมสามารถเลือกช่วงความถี่ของโครงสร้างที่จะไม่เกิดการสั่นพ้องกับผลของแรงลมได้ ในส่วนของความแข็งแรงทางโครงสร้าง พบว่าแม้ตัวเสาจะมีความสูงและดูชะลูดแต่จากผลการวิเคราะห์ค่าแรงที่กระทำบริเวณฐานเสากังหันลมไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจากผลของการตอบสนองทางโครงสร้างโดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลของ P-Delta ได้ และจากผลการวิเคราะห์กำลังโครงสร้างตามความหนาของท่อเหล็กทั้ง 3 รูปแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมแสดงให้เห็นว่าเสากังหันลมตามข้อกำหนดการออกแบบของ AISC360-10 สามารถรับแรงลมจากสภาวะความเร็วลมที่ 11.4 m/s ได้อย่างปลอดภัย โดยที่ไม่เกิดค่าความเค้นที่สูง (Over Stress) เกินไปกว่าที่โครงสร้างสามารถรับได้

ค ค ำ

ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับความช่วยเหลือด้านข้อมูลทางวิชาการ ตรวจทานงานวิจัย และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้สนับสนุนและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยนี้

ค ช ช

[1] Chen, X. (2016). Structural failure analysis of wind turbines impacted by super typhoon Usage. *Engineering Failure Analysis*, 60, pp. 391-404.

[2] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, w. and Scott G. (2009). *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-500-38060, Golden, Colorado, USA.

[3] Song, Y. (2015). CFD Simulation of the NREL Phase VI Rotor. *Wind Engineering*,

[11] ASCE/SEI 7-10. (2013). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. ASCE, 1 801 Alexander Bell Drive Reston, Virginia 20191.