# การตอบสนองเนื่องจากแรงลมของอาคารสูงโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

# WIND LOAD AND RESPONSE ANALYSIS FOR HIGH – RISE BUILDINGS BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

**ภัฏ ฉิมพาลี[1,*] ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี[2]**

*[1,2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร*
*[*]Corresponding author address: path31@gmail.com*

## บทคัดย่อ

แรงลมเป็นแรงกระทำทางด้านข้างอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งวิธีในการคำนวณแรงลมที่กระทำนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี โดยงานวิจัยนี้ได้มีการนำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาแรงลมที่กระทำกับตัวอาคารสูงและผลการตอบสนองของอาคารที่ความเร็วลมแตกต่างกันด้วยโปรแกรม ANSYS โดยมีการพิจารณาสมการความปั่นป่วนที่ใช้สำหรับจำลองในการทดสอบแบ่งออกเป็นสองวิธี (1) แบบพิจารณาการไหลปั่นป่วนแบบ SST-k-$\omega$ Model (Shear stress transport) , (Reynold averaged navier stokes , RANS) และ (2) การจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนขนาดใหญ่ (Large-eddy simulation, LES) เพื่อเปรียบเทียบผลของแรงลมที่กระทำกับตัวอาคาร พฤติกรรมการตอบสนองของตัวอาคารในทิศทางลม (along wind) และทิศทางตั้งฉากลม (across wind) จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบหมุนวนขนาดใหญ่ LES ให้ผลคำตอบที่ดีขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST-k-$\omega$ อย่างไรก็ตามแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST-k-$\omega$ ใช้เวลาในการทดสอบน้อยกว่าอีกวิธีมาก

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ , อาคารสูง , แรงลม , การตอบสนองของอาคาร , สมการความปั่นป่วน

## Abstract

Wind force is one of the lateral forces that plays an important role in structural design and analysis. There are many ways to calculate the wind loads. Computational fluid dynamic) CFD) was applied to this research in order to analyze the wind force action on high buildings and the building response at the different rate of wind speed using ANSYS program. There are two methods applied to turbulence equations used to simulate the test, namely, (1) SST-k-$\omega$ model (Shear stress transport) , (Reynold averaged navier stokes , RANS) and (2) Large-eddy simulation (LES), in order to compare the results of the force acting on the building, and the building responses both along wind and across wind. Based on the study, it was found that the Large-eddy simulation (LES) yields a little better outcome comparing to SST-k--$\omega$ model. Anyhow, SST-k-$\omega$ model took much shorter time than other method.

Keywords: Computational fluid dynamics , High-rise building , Wind loads , Building responses , Turbulence models

## 1. คำนำ

การออกแบบอาคารสูงสมัยใหม่จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาในเรื่องของแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างอาคารเนื่องจากแรงลมเป็นแรงกระทำทางด้านข้างอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งอาจสร้างความเสียหายให้แก่โครงสร้างได้หากโครงสร้างไม่ได้มีการออกแบบให้รับแรงลมที่เกิดขึ้นอย่างถูกต้องและเพียงพอ โดยที่ความรุนแรงในการตอบสนองของอาคารขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญหลายประการอาทิ เช่น รูปทรงภายนอกของอาคาร คุณสมบัติทางความเร็วลมและทิศทางพลศาสตร์ของอาคารลมเป็นต้น

การศึกษาผลของแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างนั้นอาจทำได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีแรงสถิตศาสตร์เทียบเท่า (Equivalent Static Force) คือการออกแบบจากข้อกำหนด (Design Code) ในมาตรฐานต่าง ๆ อาทิเช่น ข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารของประเทศแคนาดา (National Building Code of Canada, NBC) และ มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (มยผ. 1311-50) และอีกหนึ่งวิธีที่เป็นที่นิยมคือการทดสอบในอุโมงค์ลม แต่ในการทดสอบอุโมงค์ลม นั้นมีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น วัสดุที่ใช้ในการทดสอบส่วนใหญ่นั้นสร้างขึ้นมาจากวัสดุที่เบาแข็งและมีความถี่ธรรมชาติสูงเพื่อไม่ให้มีผลการตอบสนองแบบกำทอน Resonance ต่อแรงลมที่มาทดสอบ ซึ่งในจุดนี้เองทำให้ในการทดสอบด้วยวิธีอุโมงค์ลมนั้นไม่สามารถคำนวณหรือทดสอบวัสดุที่จะไปใช้ในการก่อสร้างจริง หรือออกแบบจริงๆได้

ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamic) มาใช้ในการทดสอบ โดยปัจจุบันนั้นวิวัฒนาการทางด้านคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ประกอบกับเทคนิคทางด้านการคำนวณโดยใช้ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) มีความก้าวหน้าอย่างมาก มีผลทำให้การวิเคราะห์การไหลด้วยวิธีเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งประโยชน์ของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีดังนี้

1. ใช้เวลาน้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลอง การวิเคราะห์โดยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วโดยผู้ออกแบบสามารถศึกษาลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันมากมาย และเลือกออกแบบรูปร่างที่ดีที่สุด
2. ประหยัดค่าใช้จ่าย โดยไม่ต้องลงทุนมากเช่นเดียวกับการทดลอง
3. ให้ข้อมูลที่สมบูรณ์ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีเชิง

ตัวเลขจะให้รายละเอียดและข้อมูลครบทุกตำแหน่ง ในขอบเขตทั้งหมดที่สนใจ

4. สามารถจำลองสภาวะทางอุดมคติ โดยในบางครั้งพบว่าการวิเคราะห์โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ถูกใช้เพื่อศึกษาปรากฏการณ์พื้นฐานซึ่งต้องพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญ และตัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกจากสภาวะทางอุดมคติได้ตัวอย่างเช่น ความเป็นสองมิติสภาวะคงตัว การอัดตัวไม่ได้ของของไหล และอื่น ๆ ซึ่งในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่สภาวะเหล่านี้สามารถทำได้ไม่ยากนัก โดยผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

5. สามารถจำลองการไหลจริงที่มีความซับซ้อนได้เช่น สามารถจำลองการไหลแบบปั่นป่วน หรือการไหลที่มีความเร็วและความดันสูง

งานวิจัยในครั้งนี้กระบวนการทาง พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamic) จึงถูกเลือกเพื่อใช้ เป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณเพื่อหาแรงที่มากระทำกับตัวอาคาร การตอบสนองของอาคาร รวมไปถึงแรงปฏิกิริยาที่ฐานของอาคารและระยะการเคลื่อนตัวของอาคาร ซึ่งในการทดสอบนี้จะแบ่งวิธีการทดสอบออกเป็น2แบบคือ การใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST-k-$\omega$ และแบบจำลอง Large eddy simulation แบบ (transient) โดยการศึกษาครั้งนี้จะใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์เพื่อแก้ไขปัญหา

## 2. ระเบียบวิธีการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของแรงลมและการตอบสนองของอาคารที่ความเร็วแตกต่างกัน ซึ่งทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 แบบ คือ

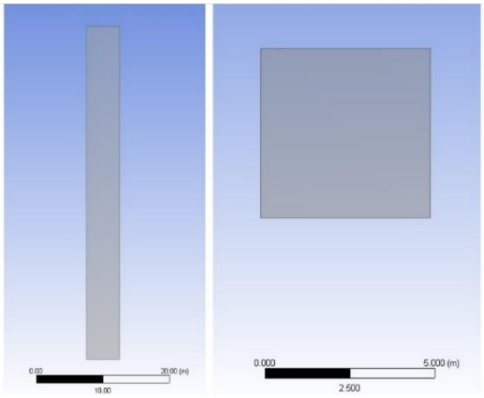
1. ทำการศึกษาโดยการใช้สมการการปั่นป่วนแบบ SST-k-$\omega$ ที่ความเร็วลมแตกต่างกัน

2. ทำการศึกษาโดยการใช้ Large Eddy Simulation ที่ความเร็วลมแตกต่างกัน

โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม Ansys และสร้างแบบจำลองแบบ transient structural เพื่อจำลองพฤติกรรมและแรงที่กระทำกับตัวอาคาร ณ ช่วงเวลาใด ๆ โดยการศึกษาเบื้องต้นนี้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ($C_d$) เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่า แรงต้านอากาศ ($F_d$) ของอาคาร และคำนวณหาระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในทิศทางลม (Along-wind) และในทิศตั้งฉากกับแรงลม (Across-Wind) ณ ช่วงเวลาใด ๆ

### *2.1 รูปแบบแบบจำลอง (Geometry)*

โดยในการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบนั้น ได้กำหนดรูปแบบของอาคารที่ใช้ในการทดสอบเป็นอาคารสูงรูปทรงสมมาตร โดยลักษณะของตัวอาคารนั้น จะมีช่วงหน้ากว้าง 5 เมตร ลึก 5 เมตร และสูง 50 เมตร โดยลักษณะบริเวณรอบตัวอาคารนั้นไม่มีสิ่งกีดขวางที่จะบดบังแรงลมที่จะกระทำกับตัวอาคาร




**รูปที่1** มุมมองด้านหน้าและด้านบนของแบบจำลองที่ทดสอบ

### *2.2 คุณสมบัติของวัสดุ (Engineering Data)*

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงลมและการตอบสนองของอาคาร โดยจะแยกคุณสมบัติของวัสดุได้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนอากาศ และส่วนโครงสร้าง

โดยคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่า ความหนาแน่น (Density) = 1.2 kg/m$^3$ และมีความความหนืด (viscosity) = 1.7894 x10$^{-5}$ kg/m.s

และในส่วนโครงสร้างนั้นการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงลมและการตอบสนองของอาคารที่สร้างขึ้นมาจากคอนกรีต ซึ่งมีค่า Density = 2300 kg/m$^3$ , Young's modulus = 3 x10$^{10}$ Pa , Poisson's Ratio = 0.18 , Bulk Modulus = 1.5625 x10$^{10}$ Pa และ Shear Modulus = 1.2712 x10$^{10}$ Pa

Properties of Outline Row 5: Concrete

| | A | B |
|---|---|---|
| 1 | Property | Value |
| 2 | Density | 2300 |
| 3 | Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion | |
| 4 | Coefficient of Thermal Expansion | 1.4E-05 |
| 5 | Isotropic Elasticity | |
| 6 | Derive from | Young's Modulus and Poisson's... |
| 7 | Young's Modulus | 3E+10 |
| 8 | Poisson's Ratio | 0.18 |
| 9 | Bulk Modulus | 1.5625E+10 |
| 10 | Shear Modulus | 1.2712E+10 |
| 11 | Tensile Yield Strength | 0 |
| 12 | Compressive Yield Strength | 0 |
| 13 | Tensile Ultimate Strength | 5E+06 |
| 14 | Compressive Ultimate Strength | 4.1E+07 |

**รูปที่2** คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

### *2.3 การสร้างปริมาตรควบคุม (Meshing)*

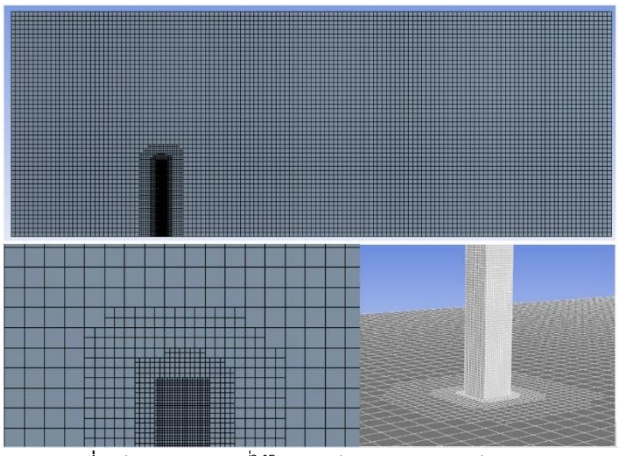
ในการศึกษาวิจัยด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นขนาดของกริดหรือเอลิเมนต์นั้นมีความสำคัญโดยตรงกับผลคำตอบที่ได้ เพราะยิ่งขนาดของกริดมีความละเอียดที่สูงคำตอบที่ได้ออกมานั้นย่อมมีความถูกต้องที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันนั้นถ้าขนาดของกริดที่เราแบ่งออกมานั้นมีความละเอียดไม่มากพอคำตอบที่ได้นั้นอาจเป็นคำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนสูง

โดยในการศึกษาวิจัยนี้กริดที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ปริมาตรควบคุมส่วนอากาศ และปริมาตรควบคุมส่วนโครงสร้าง

#### *2.3.1 ปริมาตรควบคุมส่วนอากาศ*

ในการสร้างแบบจำลองนั้นจะต้องมีการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ทดสอบ รวมไปถึงรูปแบบการจัดของวางของ Mesh บริเวณรอบๆตัวอาคาร โดยในการทดสอบนี้ที่ใช้รูปแบบของ Hexcore Mesh ซึ่งเป็นกริดที่มีรูปทรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยในบริเวณใกล้ตัวอาคารนั้น

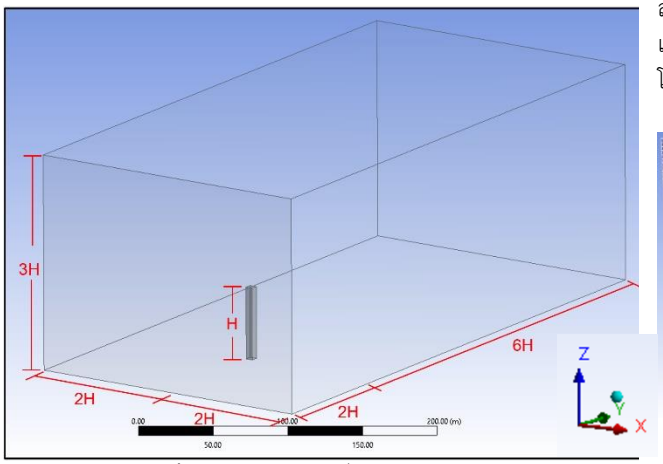
จำมีปริมาณจำนวนของกริดหนาแน่น และจะค่อยๆน้อยลงเมื่อห่างจากตัวอาคารตามรูปที่3 โดยรูปแบบของ Mesh ชนิดจะเป็นการลดปริมาตรของกริดที่ส่งผลต่อตัวอาคารออกไป รวมไปถึงเพิ่มปริมาณกริด บริเวณที่ส่งผลต่อตัวอาคาร และความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากทดสอบนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่สูง



**รูปที่3** ลักษณะของกริดที่ใช้ในการแบ่งปริมาตรควบคุมส่วนอากาศ

ในส่วนขนาดของปริมาตรควบคุมอากาศนั้น ถ้ากำหนดให้ตึกมีความสูง H จะให้ความสูงของขอบเขตเท่ากับ 3H ระยะห่างระหว่างตัวอาคารกับขอบเขตทางข้าง 2H ระยะหว่างระหว่างตัวอาคารกับขอบเขตทางเข้า 2H และระยะหว่างตัวอาคารกับขอบเขตทางออก 6H

ดังนั้นขนาดของขอบเขตที่ใช้ในการทดลองมีขนาดกว้าง 200 เมตร ยาว 400 เมตร และสูง 150เมตร

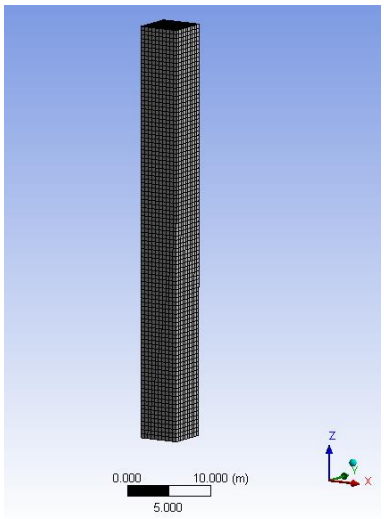



**รูปที่4** ขนาดของขอบเขตที่ใช้ในการทดสอบ

*2.3.2 ปริมาตรควบคุมส่วนโครงสร้าง*

อาคารที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 5 เมตร และสูง 50 เมตร โดยจะทำการแบ่งตึกออกเป็นทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดด้านกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร

โดยถ้าทำการแบ่งขนาดของกริดให้มีขนาดเล็กขึ้นก็จะทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นแม่งยำมากขึ้น รวมไปถึงระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบก็มากขึ้นตามไปด้วย



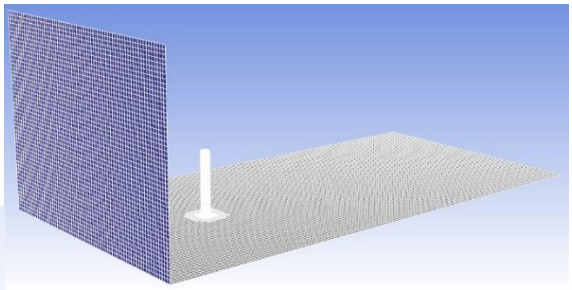

**รูปที่5** ลักษณะของกริดที่ใช้ในการแบ่งปริมาตรควบคุมส่วนโครงสร้าง

*2.4 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)*

ในการแก้ปัญหาโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ นั้นเงื่อนไขขอบก็เป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากเงื่อนไขขอบนี้จะเป็นตัวกำหนดลักษณะเฉพาะของแต่ละปัญหา ซึ่งเงื่อนไขขอบที่ใช้สำหรับการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้คือ เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition) เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary condition) และเงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary condition)

*2.4.1 เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary condition)*

ลักษณะของลมที่กระทำกับตัวอาคารที่ใช้ในการทดสอบนั้นเป็นความเร็วลมเฉลี่ย โดยความเร็วลมนั้นมีทิศทางพุ่งออกจากด้าน Inlet ที่แสดงในรูปที่6 โดยจะทำการทดสอบที่ความเร็วลม 5 , 10 , 15 , 20 และ 25 m/s



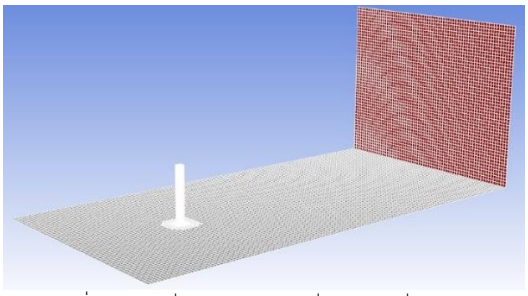
**รูปที่6** หน้าตัดที่แสดงทิศทางของเงื่อนไขขอบที่ทางเข้า

*2.4.2 เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall Boundary Condition)*

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตบริเวณผิวของตัวอาคารรวมไปถึงผิวพื้นนั้นไม่มีการลื่นไหล (No-slip condition)

*2.4.3 เงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet Boundary Condition)*

สำหรับในการทดสอบนั้นจะกำหนดให้บริเวณทางออกของลมในการทดสอบหรือด้าน Outlet นั้นมีค่าความดันที่ขาออกเท่ากับศูนย์ ในบริเวณที่แสดงในรูปที่7



**รูปที่7** หน้าตัดที่แสดงทิศทางของเงื่อนไขขอบที่ทางออก

*2.5 เงื่อนไขการจำลองการไหล*

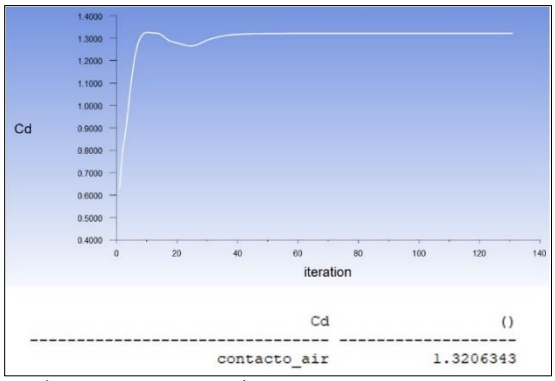
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST-k-$\omega$และ Large Eddy Simulation มาทำการจำลองการไหล เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงลมที่กระทำกับตัวอาคาร

โดยในการทดสอบนี้ได้ทำการจำลองแรงลมที่มากระทำกับตัวอาคารเป็นเวลา 10 วินาที โดยทำการแบ่ง Time step ออกเป็นครั้งละ 0.1 วินาที

## 3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

*3.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ*

แรงด้านอากาศเป็นแรงที่มีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่หรือทิศทางตรงข้ามกับแรงที่พยายามจะทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านกระแสอากาศ ซึ่งโปรแกรม Ansys fluent นั้นสามารถทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ($C_d$) โดย (Sharma,Parekar, 2019) ได้ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรูปทรงที่แตกต่างกันออกไปซึ่งทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IS875-PART3 และ (Krishna et al., 2002) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่คำนวณจากโปรแกรม Ansys นั้นมีความต่างจากค่ามาตรฐาน IS875-PART3 อยู่ประมาณร้อยละ 5-8 % โดยความเร็วลมที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศนั้นเลือกใช้ที่ 2.8 m/s และเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Spalart,Allmaras, 1992) ในการทดสอบ




**รูปที่8** การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศโดยโปรแกรม Ansys

โดยผลที่ได้ออกมานั้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของอาคารที่มีขนาด 5m x 5m x 50m มีค่าเท่ากับ 1.32 ซึ่งจะสามารถนำไปหาแรงต้านอากาศจากสมการที่ 1

$$\overline{F}_D = \frac{1}{2}\rho \overline{U}^2 A C_D \quad (1)$$

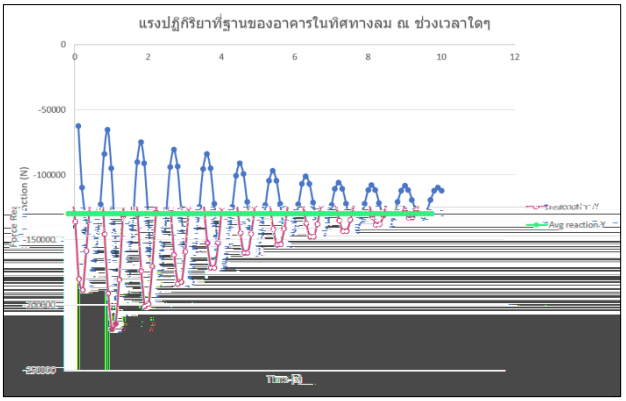
$$\overline{F}_D = \frac{1}{2} \times 1.2 \times v^2 \times 250 \times 1.32 \quad (2)$$

$$\overline{F}_D = 198 v^2 \quad (3)$$

*3.2 แรงปฏิกิริยาที่ฐานของอาคาร*

ในการทดสอบนี้เบื้องต้นได้ทำการทดสอบแรงลมที่ความเร็ว 25 เมตรต่อวินาทีโดยทำการทดสอบแบบ Large Eddy Simulation โดยทำการจำลองอาคารแบบ transient structural โดยการจำลองแรงลมที่มากระทำกับตัวอาคารเป็นเวลา 10 วินาที โดยจะสามารถนำค่าแรงปฏิกิริยาที่ฐานของตัวอาคารในทิศแกน Y (ทิศเดียวกับแรงลม) ที่ช่วงเวลาใดๆ พบว่าแรงปฏิกิริยาในช่วงแรกนั้นมีค่าสูงเนื่องจากในช่วงแรกนั้นตัวอาคารมีการเคลื่อนตัวในทิศทางเดียวกับลมค่อนข้างมากและค่อยๆลดลง

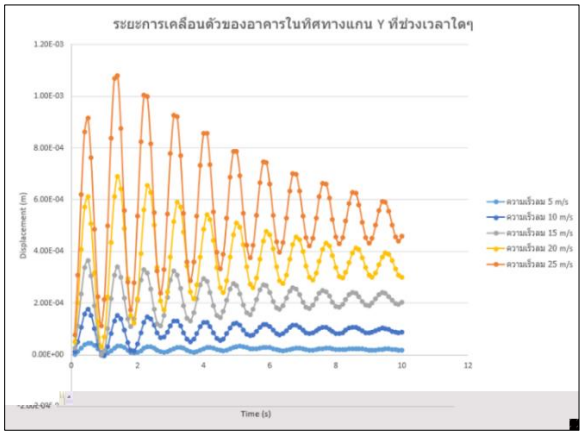
ซึ่งค่าเฉลี่ยของแรงปฏิกิริยาในแกน Y ในช่วงเวลา 10 วินาที นั้นเท่ากับ 130,052 N โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมการแรงต้านอากาศที่ได้จากสมการที่3 $\overline{F}_D = 198 v^2$ โดยแทนค่าความเร็วลม $V = 25$ m/s จะสามารถคำนวณค่าแรงต้านอากาศได้เท่ากับ 123,750 N ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยของแรงปฏิกิริยาในทิศทางแกน Y อยู่ประมาณ 5 % อันเนื่องมาจากความละเอียดของ mesh ที่ใช้ในการทดสอบนั้นยังไม่ละเอียดมากเพียงพอรวมไปถึงระยะเวลาในการทดสอบนั้นสั้นเกินไปจึงทำให้ค่าที่ได้ออกมานั้นคลาดเคลื่อนได้



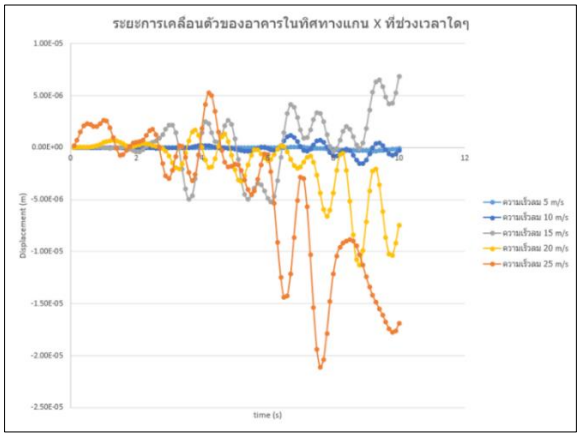

**รูปที่9** แรงปฏิกิริยาที่ฐานของอาคารในทิศทางแกนYที่ความเร็วลม 25 m/s

*3.3 ระยะการเคลื่อนตัวของอาคาร*

โดยในโปรแกรม Ansys นั้นเราสามารถใช้ฟังชัน System Coupling เพื่อทำการคำนวณแรงลมที่กระทำกับตัวอาคารแบบ transient structural โดยจะสามารถหารูปแบบและระยะเคลื่อนตัวของอาคารที่ช่วงเวลาใดๆได้ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบความเร็วลมที่5,10,15,20และ25 เมตรต่อวินาที เพื่อศึกษาระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในทิศทางแกน Y (Along-Wind) และแกน X (Across-Wind) ดังแสดงในรูปที่10 และรูปที่11



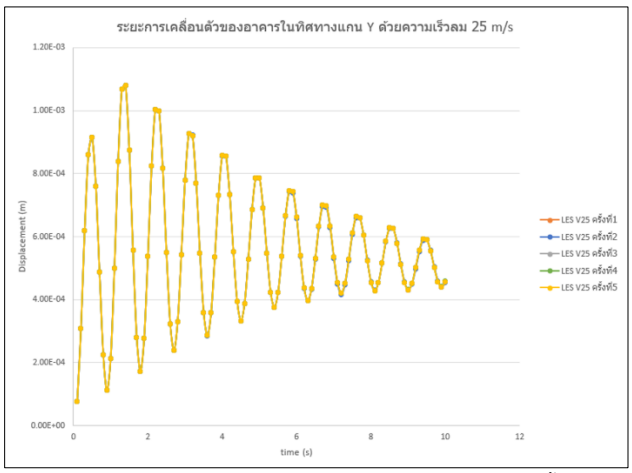

**รูปที่10** ระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในทิศทาง Y ที่ช่วงเวลาใดๆ



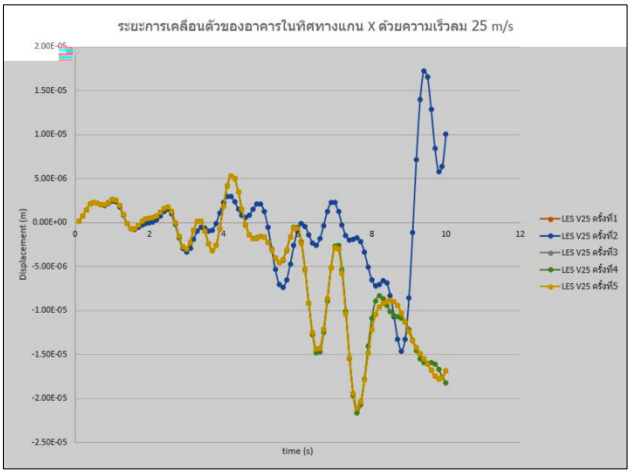

**รูปที่11** ระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในทิศทาง X ที่ช่วงเวลาใดๆ

จากรูปที่10 จะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนตัวของอาคารในแต่ละความเร็วลมใดๆในทิศทางแกน Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกันกับลมนั้น มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยจะมีระยะการเคลื่อนตัวในช่วงแรกที่สูงและค่อยๆ ลดลงจนเกือบจะเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และในรูปที่11 เป็นระยะการเคลื่อนตัวในทิศทางแกน X ซึ่งเป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงลม โดยจะเห็นได้ว่าระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในแต่ละความเร็วลมนั้นไม่มีความสัมพันธ์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

โดยเมื่อทำการทดสอบซ้ำโดยกำหนดค่าทุกอย่างเหมือนเดิมเป็นจำนวน 5 ครั้ง พบว่าระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในทิศทางแกน Y (Along-Wind) ในรูปที่12 นั้นให้ผลของคำตอบที่มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 5 ครั้ง แต่ในทางกลับกันระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในทิศทางแกน X (Across-Wind) ในรูปที่13 นั้นให้ผลของคำตอบมีค่าใกล้เคียงกัน 4 ครั้ง เป็นเพราะว่าวิธีการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นเป็นการคำนวณแบบลองผิดลองถูกโดยจะทำการแก้สมการไปจนกว่าจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ถูกต้องที่สุด




**รูปที่12** ระยะการเคลื่อนตัวของอาคารทิศทาง Y โดยการทดสอบซ้ำ




**รูปที่13** ระยะการเคลื่อนตัวของอาคารทิศทาง X โดยการทดสอบซ้ำ

## 4. สรุปผล

จากการทดสอบหาแรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อฐานของตัวอาคารนั้น พบว่า ค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Ansys นั้นมีความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยของแรงปฏิกิริยาในทิศทางแกน Y อยู่ประมาณ 5 % อันเนื่องมาจากความละเอียดของ mesh ที่ใช้ในการทดสอบนั้นยังไม่ละเอียดมากเพียงพอรวมไปถึงระยะเวลาในการทดสอบนั้นสั้นเกินไปจึงทำให้ค่าที่ได้ออกมานั้นคลาดเคลื่อนได้

ในส่วนระยะการเคลื่อนตัวที่ยอดของอาคารนั้น ระยะเคลื่อนตัวในทิศทางแกน Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกันกับลมนั้น ระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในแต่ละความเร็วลมใดๆ มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของตัวอาคารนั้นมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยจะมีระยะการเคลื่อนตัวในช่วงแรกที่สูงและค่อยๆลดลงจนเกือบจะเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และระยะการเคลื่อนตัวในทิศทางแกน X ซึ่งเป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงลม โดยจะเห็นได้ว่าระยะการเคลื่อนตัวของอาคารในแต่ละความเร็วลมนั้นไม่มีความสัมพันธ์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากหลักการคำนวณของโปรแกรมนั้นเป็นคำนวณโดยวิธีการลองผิดลองถูก โดยค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นจะสามารถหาได้จากการนำผลการทดสอบหลายๆครั้งมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำมาใช้ในการคิดวิเคราะห์ที่แม่นยำขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ได้มอบความรู้และโปรแกรมเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

[1] Assaad. (2015). *Wind effect on super-tall buildings using computational fluid dynamics and structural dynamics.* Florida Atlantic University,

[2] Davenport. (1960). *Rationale for determining design wind velocities*. Retrieved from Gordan, et al. (2014). Interaction of Across-Wind and Along-Wind with Tall Buildings. *Engineering Mechanics,*

[3] Gordan, et al. (2014). Interaction of Across-Wind and Along-Wind with Tall Buildings. *Engineering Mechanics,*

[4] Krishna, et al. (2002). IS: 875 (Part3): Wind loads on buildings and structures-proposed draft & commentary. *Document No.: IITK-GSDMA-Wind*,

[5] Launder. (1974). Spalding. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*.

[6] Menter. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal,*

[7] Mikitiuk, et al. (1995). *Probability Based Wind Loadings for the Design of Transmission Structures, Part AA Study of The Wind Climate for Thailand*. Retrieved from Mompean. (1998). Numerical simulation of a turbulent flow near a right-angled corner using the Speziale non-linear model with RNG k–**ε** equations. *Computers & Fluids,*

[8] Murakami. (1998). Overview of turbulence models applied in CWE–1997. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,*

[9] Parv, et al. (2012). *Comparative study of wind effects on tall buildings using international codes and CFD.* Paper presented at the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS).

[10] Rodi. (1976). A new algebraic relation for calculating the Reynolds stresses. *GaMuM,*

[11] Sharma,Parekar. (2019). Drag Coefficient of Tall Building by CFD Method using ANSYS.

[12] Zhou,Kareem. (2002). Definition of wind profiles in ASCE 7. *journal of Structural Engineering,*

[13] Zhou, et al. (2002). Along-wind load effects on tall buildings: comparative study of major international codes and standards. *journal of Structural Engineering,*

[14] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2550). มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร. กรุงเทพฯ

[15] อลงกรณ์. (2545). การเปรียบเทียบแรงลมระหว่างมาตรฐานต่าง ๆ กับข้อมูลการทดลองในอุโมงค์ลม วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[16] เอื้อศิริวรรณ. (2538). ความเร็วลมออกแบบและหน่วยแรงลมออกแบบเสนอแนะสำหรับประเทศไทย. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.