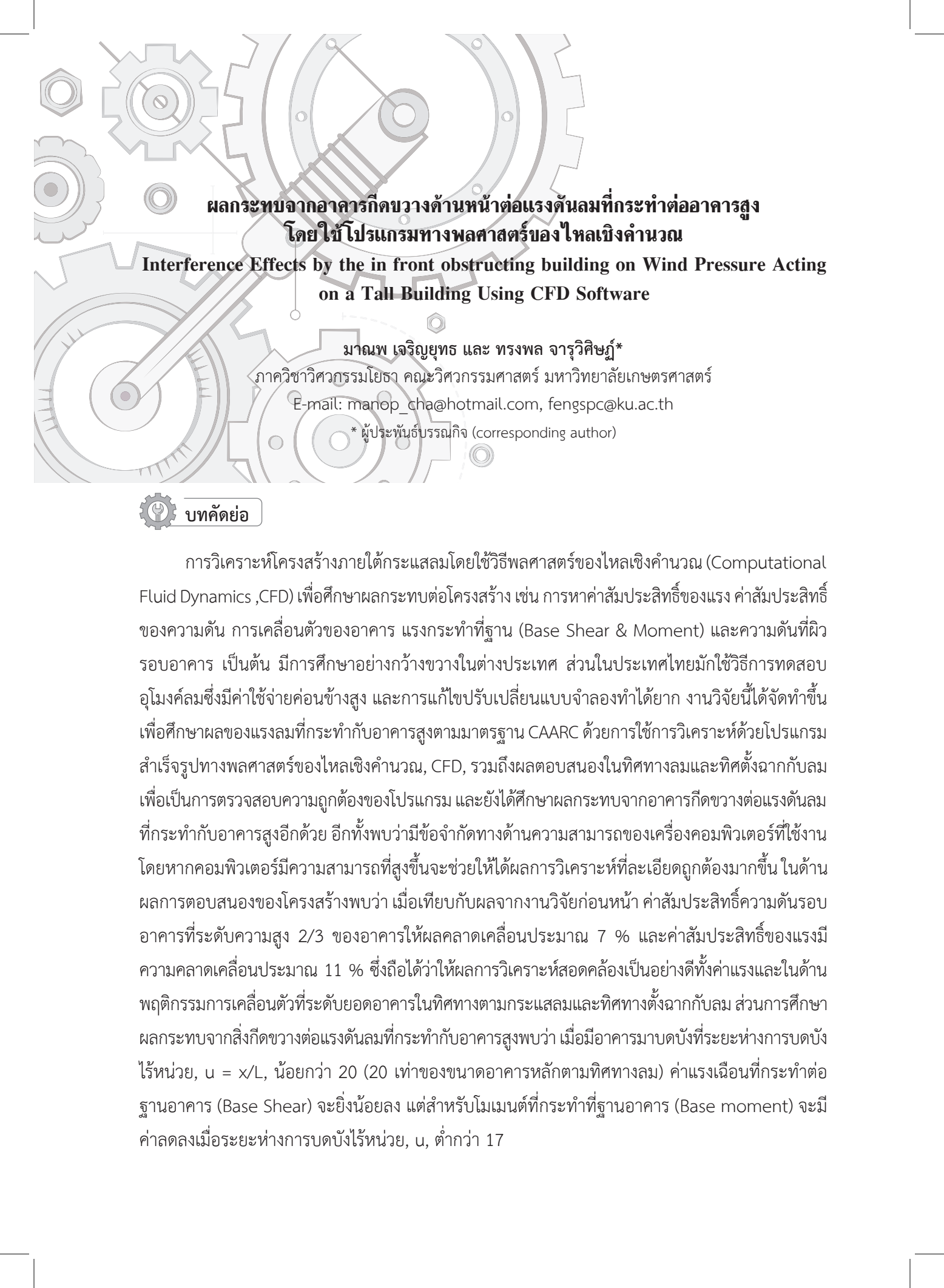




ผลกระทบจากอาคารกีดขวางด้านหน้าต่อแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Interference Effects by the in front obstructing building on Wind Pressure Acting on a Tall Building Using CFD Software

มานพ เจริญยุทธ และ ทรงพล จารุวิศิษฐ์*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: manop_cha@hotmail.com, fengspc@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้กระแสลมโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics ,CFD) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้าง เช่น การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรง ค่าสัมประสิทธิ์ของความดัน การเคลื่อนตัวของอาคาร แรงกระทำที่ฐาน (Base Shear & Moment) และความดันที่ผิวรอบอาคาร เป็นต้น มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ ส่วนในประเทศไทยมักใช้วิธีการทดสอบอุโมงค์ลมซึ่งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และการแก้ไขปรับเปลี่ยนแบบจำลองทำได้ยาก งานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงตามมาตรฐาน CAARC ด้วยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, CFD, รวมถึงผลตอบสนองในทิศทางลมและทิศตั้งฉากกับลมเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม และยังได้ศึกษาผลกระทบจากอาคารกีดขวางต่อแรงดันลมที่กระทำกับอาคารสูงอีกด้วย อีกทั้งพบว่ามีข้อจำกัดทางด้านความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งาน โดยหากคอมพิวเตอร์มีความสามารถที่สูงขึ้นจะช่วยให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดถูกต้องมากขึ้น ในด้านผลการตอบสนองของโครงสร้างพบว่า เมื่อเทียบกับผลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ค่าสัมประสิทธิ์ความดันรอบอาคารที่ระดับความสูง 2/3 ของอาคารให้ผลคลาดเคลื่อนประมาณ 7 % และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 11 % ซึ่งถือได้ว่าให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องเป็นอย่างดีทั้งค่าแรงและในด้านพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตัวยอดอาคารในทิศทางตามกระแสลมและทิศทางตั้งฉากกับลม ส่วนการศึกษาผลกระทบจากสิ่งกีดขวางต่อแรงดันลมที่กระทำกับอาคารสูงพบว่า เมื่อมีอาคารมาบังที่ยะห่างการบังไว้หน่วย, $u = x/L$, น้อยกว่า 20 (20 เท่าของขนาดอาคารหลักตามทิศทางลม) ค่าแรงเฉือนที่กระทำต่อฐานอาคาร (Base Shear) จะยิ่งน้อยลง แต่สำหรับโมเมนต์ที่กระทำที่ฐานอาคาร (Base moment) จะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างการบังไว้หน่วย, u , ต่ำกว่า 17



คำสำคัญ:

แรงลม; อาคารสูง; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; แรงกระทำที่ฐาน; โมเมนต์กระทำที่ฐาน



Abstract

The analysis of wind forces acting on a structure using Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques is widely used in many countries to determine force and pressure coefficients, building top displacements, base shear and moment, surface pressure around the building, etc. This research was conducted using the CFD technique to study the wind effects on a tall building model according to the CARRC (Commonwealth Advisory Aeronautical Council) standard, including building responses in the along-wind and across-wind directions, to verify the applied software and analysis results. Additionally, the interference effects of an obstructing building on wind pressure acting on a tall building were studied. However, in Thailand, wind tunnel experiments are typically used to determine wind force acting on a building model, which is complex and requires expensive instruments. Furthermore, the wind tunnel test is not flexible for adjusting the model to study different experimental conditions and parameters. The accuracy of the analysis was verified by comparing the simulated results of a CFD model software with the results from wind tunnel experimental results of previous research. It was found that the pressure and force coefficients at the location of two-thirds height of the building were slightly different from the experimental results, about 7% and 11%, respectively. Nonetheless, the simulation results can be concluded to be in accordance with the vibration at the top of the building in both along-wind and across-wind directions. Regarding the study of interference effects by the obstructing building, it was found that, with the obstruct distance, u , less than 20, the closer the obstructing building was, the smaller the base shear of the main building could be observed. The same interference effect for the base moment of the main building can be observed since the reduced obstructing distance, $u = x/L$, is less than 17. Finally, a manual for performing CFD analysis using CFD commercial software for studying wind effects on a tall building has been prepared for further research. It is noted that the computer's performance is an important factor for the CFD analysis.

With higher computer performance, more accurate simulation results and faster computation can be obtained.

Keywords: Wind load; high-rises building; computational fluid dynamics; base shear; base moment

1. บทนำและการศึกษาวิจัยในอดีต

แรงลมนับว่ามีความสำคัญต่อการออกแบบอาคารสูงเป็นอย่างมาก นอกจากจะก่อให้เกิดหน่วยแรงต่าง ๆ ขึ้นกับส่วนของโครงสร้างแล้วยังก่อให้เกิดการโยกตัวและการสั่นไหวของโครงสร้างได้ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอาจก่อให้เกิดการวิบัติเนื่องจากเกิดพฤติกรรมการสั่นแบบกำทอนที่ความถี่ของการสั่นของอาคารเนื่องจากแรงลมไปสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของอาคารจนทำให้โครงสร้างเกิดความล้าของวัสดุส่วนโครงสร้าง นอกจากนี้การสั่นของอาคารหากมากเกินไปยังอาจทำให้ผู้ใช้อาคารรู้สึกไม่สบายในการใช้งานอาคารได้ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงผลกระทบของแรงลม ที่กระทำต่อโครงสร้างอาคารเพื่อปรับปรุงทำให้องค์อาคารมีความแข็งแรง และสามารถต้านทานแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างได้ การศึกษาถึงผลกระทบของแรงลมที่กระทำต่ออาคารในประเทศไทย มักใช้การทดสอบอุโมงค์ลมเป็นหลักซึ่งจะมีข้อจำกัดในเรื่องการแก้ไขปรับเปลี่ยนแบบจำลองอาคารและการเปลี่ยนเงื่อนไขสภาพการทดสอบที่ทำได้ยาก ขาดความยืดหยุ่น และมีค่าใช้จ่ายสูง การคำนวณโดยใช้หลักพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถือเป็นอีกทางเลือก

หนึ่งที่ใช้ทำนายพฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างเมื่อถูกแรงลมกระทำแทนการทดสอบอุโมงค์ลมได้ ทำให้การวิเคราะห์การตอบสนองของอาคารมีความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบเดิมที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลม และใช้การคำนวณจากสูตรการประมาณอย่างง่าย ซึ่งเป็นผลทางสถิติศาสตร์เป็นหลัก นอกจากนี้ในปัจจุบันมีอาคารสูงต่าง ๆ ถูกสร้างขึ้นมากมาย ซึ่งบางกรณีอาจมีการบดบังจากอาคารสูงข้างเคียง จึงยิ่งทำให้มีความซับซ้อนในการคำนวณหาค่าแรงลมที่กระทำต่ออาคารมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาจำลองอาคารสูงจำนวน 1 อาคารที่บดบังกระแสลมต่ออาคารหลักที่ถูกบดบังด้วยการวิเคราะห์ CFD เพื่อวิเคราะห์แรงกระทำที่ฐานอาคารหลัก (Base shear & moment) และแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลักที่ความสูงระยะต่าง ๆ

ที่ผ่านมาได้มีการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้หาค่าความดันที่รอบผิวอาคาร [1] สมบัติของแรงลมและโมเมนต์สำหรับอาคารเดี่ยวโดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation (LES)) ซึ่งพบว่าแบบจำลอง LES ให้ผลแรงลมที่กระทำกับตึกสูงเป็นที่น่าพอใจ โดย

การใช้เทคนิค CFD นี้ถือได้ว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบ ทำให้สามารถประเมินผลกระทบของแรงลมที่กระทำกับอาคารได้อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาเป็นค่าแรงลัพท์กระทำที่ฐานอาคาร (Base shear and moment) ต่อมาได้มีการศึกษาโดยใช้การจำลองขนาดอาคารสูงตามมาตรฐาน CAARC [2-4] อาคารซึ่งมีขนาด ความสูง (H) = 180 เมตร ความยาว (L) = 30 เมตร ความกว้าง (w) = 45 เมตร และใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CFD โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation Dynamic) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรง ค่าสัมประสิทธิ์ของความดัน การเคลื่อนตัวของอาคาร โดยเทียบผลกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลม และที่ใช้การจำลองเชิงตัวเลข พบว่าได้ผลสอดคล้องเป็นอย่างดี

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลของงานวิจัยในอดีตกับผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม CFD ที่ใช้ และเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของแรงลมที่เกิดขึ้นด้วย สำหรับกรณีที่มีอาคารมาดบังกระแสลม ได้มีการศึกษาผลกระทบของอาคารบดบังที่กระทำต่ออาคารสูง [5, 6] โดยสนใจศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารกับระยะห่างระหว่างอาคารที่เพิ่มมากขึ้น และผลของทิศทางลมที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า กรณีที่แรงลมกระทำในทิศทาง 0° (ตั้งฉากกับตัวอาคารหลักและอาคารที่บดบัง) จะต้องมีระยะห่างระหว่างอาคารมากถึง 56 เท่าของความกว้างอาคาร ถึงจะไม่มีผลกระทบจากการบดบังอาคาร ส่วนกรณีที่แรงลมกระทำในทิศทาง 90°

(ขนานกับแนวอาคารหลักและอาคารบดบัง) จะต้องมียะยะห่างระหว่างอาคารประมาณ 10 เท่าของความกว้างอาคาร จึงจะไม่มีผลกระทบจากตำแหน่งของอาคารข้างเคียงต่อแรงลมที่กระทำกับอาคารหลัก อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการศึกษาในด้านค่าแรงกระทำที่ฐานอาคาร

มีการศึกษาแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารสูง โดยทดสอบอุโมงค์ลมเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [7-9] โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation Dynamic) อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 2.59 เมตร, สูง 2.13 เมตร และแบบจำลองอาคารลดขนาด 1:400 จากอาคารจริงที่มีขนาดกว้าง 30.48 เมตร, ยาว 45.72 เมตร และสูง 182.88 เมตร ความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบคือ $U_H = 12.12 \text{ m/s}$ โดยทำการศึกษา 3 กรณีดังนี้ 1. อาคารเดี่ยว ไม่มีอาคารอื่นกีดขวาง 2. มีอาคารกีดขวางขนาดความสูงเท่ากัน และ 3. มีอาคารกีดขวางขนาดความสูงครึ่งหนึ่งของอาคารหลัก ผลการวิจัยพบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมและผลการทดสอบอุโมงค์ลมมีความสอดคล้องเป็นอย่างดี โดยมีค่าแตกต่างกันมากที่สุดประมาณ 16% นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบของอาคารบดบังต่อแรงลมที่กระทำต่ออาคารสูงที่มีขนาดความสูงบดบัง 20% - 50% ของความสูงอาคารหลัก [10-12] ด้วยการวิเคราะห์โปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และระยะบดบังของอาคารห่างไม่เกิน 1.75 เท่าของความสูงอาคารที่บดบัง ซึ่งได้ผลการวิจัยว่าค่าแรงดัน

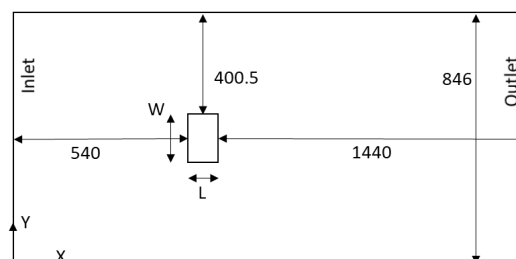
ในส่วนที่ถูกอาคารบดบังจะน้อยกว่าส่วนที่ไม่ถูกอาคารบดบัง และเมื่ออาคารที่บดบังอยู่ใกล้จะยิ่งทำให้ค่าแรงดันลดลงเฉพาะในส่วนของอาคารที่ถูกบดบัง

จากงานวิจัยในอดีตต่าง ๆ ที่นำเสนอ จะสังเกตได้ว่ายังไม่มีงานวิจัยที่พิจารณาค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานของอาคารหลัก ซึ่งปกติแล้วจะเป็นค่าแรงสำคัญในการออกแบบอาคารเป็นลำดับแรก ๆ และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลของการทดสอบอุโมงค์ลมได้โดยตรง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงสัมประสิทธิ์ความดันที่ผิวรอบอาคาร สัมประสิทธิ์ของแรงเฉือนและโมเมนต์ที่กระทำต่ออาคารหลัก รวมถึงการเคลื่อนตัวที่ระดับยอดอาคารทั้งในทิศทางตามกระแสลมและตั้งฉากกับกระแสลม ที่ค่าความเร็วลมต่างๆ และศึกษาแรงกระทำที่ฐานอาคาร (Base shear & moment) ในกรณีที่มีอาคารมาบดบังด้านหน้าของอาคารหลักที่ระยะบดบังต่าง ๆ เพื่อสร้างความรู้ด้านแรงลมที่กระทำต่ออาคารกรณีที่ถูกบดบังและความรู้ทางด้านการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในงานวิศวกรรมโครงสร้างอาคาร

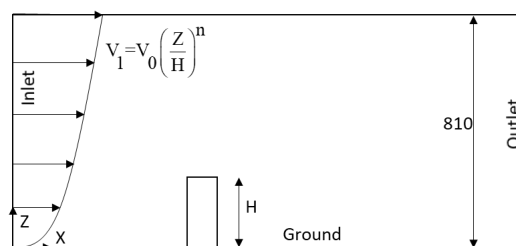
2. การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมสำเร็จรูปทาง CFD

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ CFD ด้วยโปรแกรม Ansys CFX version 17.1 ซึ่งได้ทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยเทียบผลการวิเคราะห์กับผลของงานวิจัยในอดีตที่เป็นการวิเคราะห์แรงลมที่กระทำต่ออาคารสูงเดี่ยวอาคารเดียวทั้งการทดสอบอุโมงค์ลมและการวิเคราะห์ simulation [1]

โดยใช้แบบจำลองอาคารขนาด 1:1 สูง (H) = 180 เมตร, กว้าง (W) = 45 เมตร, ยาว (L) = 30 เมตร ในขอบเขต (Computational domain) ขนาดสูง = 810 เมตร, กว้าง = 846 เมตร และยาว = 2010 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 1



a) ภาพ plan อาคาร



b) ภาพ elevation อาคาร

ภาพที่ 1 ขนาดของแบบจำลองอาคารและ
ขอบเขตการจำลองที่ทำการศึกษา

2.1 คุณสมบัติแบบจำลองอาคาร

ในการวิเคราะห์ได้กำหนดสมบัติเชิงกลของโครงสร้างอาคารตามมาตรฐาน CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Council) ดังนี้ Damping ratio 1%, ความหนาแน่นมวลอาคาร (Specific mass) 160 kg/m^3 , อัตราส่วนปัวซอง 0.25, Young's modulus $2.3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ แบบจำลองอาคารหลักถูกจำลองด้วย solid element



ชนิด hexahedral จำนวน $5 \times 8 \times 30 = 1,200$ ชิ้นส่วน (มาจากการกำหนดขนาดชิ้นส่วนเอลิเมนต์ที่ 6 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เนื่องจากเป็นส่วนของแบบจำลองอาคารที่ไม่ได้พิจารณาค่าแรงภายในอาคาร) โดยแบบจำลองอาคารหลักมีค่าความถี่ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ของโปรแกรม CFD = 0.1788 Hz. และค่าความถี่ธรรมชาติจากการคิดจากโครงสร้างคานยื่นอย่างง่าย = 0.1793 Hz. ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกัน

2.2 คุณสมบัติแบบจำลองกระแสลม

กระแสลมที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบชั้นขอบเขตความเร็ว (boundary layer velocity profile) เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงโดยให้เป็นไปตามสมการกฎของกำลัง (Power law) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$V_{(Z_1)} = V_{(Z_2)} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

เมื่อ $V_{(Z_1)}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง Z_1 , $V_{(Z_2)}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงอ้างอิง Z_2 , α คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับลักษณะพื้นผิวและภูมิประเทศ และมีค่าคงที่ทางกายภาพของมวลอากาศดังนี้ Specific mass 1.25 Kg/m^3 , Dynamic viscosity $7.03 \times 10^{-2} \text{ Ns/m}^2$, $\alpha = 0.2$, ค่าความเร็วลมอ้างอิงใช้การอ้างอิงที่ตำแหน่งระดับสูงสุดของอาคาร ($Z=180 \text{ m}$) ซึ่งในการวิเคราะห์จะเปลี่ยนไปตามความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) ที่ทำการศึกษาในแต่ละกรณีดังแสดงในตารางที่ 1 โดยความเร็วลมลดรูปนิยามด้วย $v = V/(nW)$ เมื่อ V = ความเร็วลมที่ตำแหน่งระดับยอดอาคาร, n คือ

ค่าความถี่ธรรมชาติ และ W คือ ความยาวอาคาร และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation (LES) จำลองมวลอากาศด้วยเอลิเมนต์แบบ tetrahedral จำนวนทั้งสิ้น 283,013 ชิ้นส่วน (มาจากการกำหนดขนาดชิ้นส่วนเอลิเมนต์ของอากาศที่ 3 เมตร อัตราการขยาย 1.125 ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์แรงดันลมใกล้เคียงกับกรณีที่ทดลองใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กกว่านี้แต่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานกว่ามากซึ่งติดข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่น่าพอใจและยอมรับได้ในการวิเคราะห์ด้วย CFD จากงานวิจัยในอดีต [1]

ตารางที่ 1 ค่าความเร็วลมลดรูป (Reduced velocity)

ความเร็วลมลดรูป	2	4	6	10
$v \text{ (m/s.)}$	16.09	32.18	48.27	80.45

2.3 เงื่อนไขขอบเขตและการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

เงื่อนไขขอบเขตมีผลโดยตรงต่อการศึกษาพฤติกรรมของไหล การกำหนดเงื่อนไขให้สอดคล้องกับสภาวะปัญหาการไหลจริงย่อมทำให้การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมปัญหาของการไหลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเภทเงื่อนไขของขอบเขตในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามธรรมชาติคือ กำหนดให้มีแรงลมเข้าจากทางด้านหน้าอาคารในลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยแปรผันตามความสูง ($V_{(0)} - V_{(180)}$) ไหลผ่านอาคารออกไปโดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตความดันที่จุดไหลออก

เท่ากับศูนย์ ส่วนด้านข้างของขอบเขตแบบจำลอง ได้กำหนดให้มีความเร็วลมเฉลี่ยเช่นเดียวกับทางเข้า ในการวิเคราะห์ CFD ใช้ค่าระยะเวลา (Dt) = 0.2 วินาที ซึ่งพบว่าได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงไม่ต่างกับการวิเคราะห์ด้วยค่าระยะเวลาที่ละเอียดกว่านี้ (0.1 วินาที) และใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ผลของการจำลองทั้งหมดยาว 350 วินาที

เมื่อลมพัดเข้าหาโครงสร้างอาคาร ลมจะปะทะอาคารและแยกตัวออกไปรอบ ๆ โครงสร้าง ทำให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์กระทำกับโครงสร้าง เช่น แรงยก (lift force) แรงลาก (drag force) แรงด้านข้าง (side force) และโมเมนต์ (moment) ซึ่งสามารถแสดงค่าในรูปของ สัมประสิทธิ์ของแรง ต่างๆ ที่เป็นค่าแบบไร้หน่วย (normalized value) ที่ได้จากการหาร ค่าแรงต่างๆ ด้วยค่าแรงอ้างอิงที่คำนวณจากค่าความเร็วม (velocity pressure) $= 1/2\rho\int_0^H V^2 dZ$ ดังนี้

$$C_{Fx} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{Xi}}{1/2\rho W \int_0^H V^2 dZ}; C_{\sigma Fx} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma F_{Xi}}{1/2\rho V_H^2 WH} \quad (2)$$

$$C_{Fy} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{Yi}}{1/2\rho W \int_0^H V^2 dZ}; C_{\sigma Fy} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma F_{Yi}}{1/2\rho V_H^2 WH} \quad (3)$$

$$C_{Mx} = \frac{\sum_{i=1}^N M_{Xi}}{1/2\rho V_H^2 WH^2}; C_{\sigma Mx} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma M_{Xi}}{1/2\rho V_H^2 WH^2} \quad (4)$$

$$C_{My} = \frac{\sum_{i=1}^N M_{Yi}}{1/2\rho V_H^2 WH^2}; C_{\sigma My} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma M_{Yi}}{1/2\rho V_H^2 WH^2} \quad (5)$$

$$C_{Pi} = \frac{P_i - P_0}{1/2\rho V_H^2} \quad (6)$$

เมื่อ F_x, F_y คือ ค่าแรงในแนวแกน x และ y ตามลำดับ, M_x, M_y คือ ค่าโมเมนต์รอบแกน x และ y ตามลำดับ, $\sigma F_x, \sigma F_y$ คือ ค่าแรงในแนวแกน x และ y แบบ rms (root mean square) ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการกระจายของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย, $\sigma M_x, \sigma M_y$ คือ ค่าโมเมนต์รอบแกน x และ y แบบ rms ตามลำดับ, C_{Fx} คือ สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวแกน x, C_{Fy} คือ สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวแกน y, C_{Mx} คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน x, C_{My} คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน y, C_p คือ สัมประสิทธิ์ของความดันบนผิวอาคารโดย, P_i คือ ความดันด้านหน้าที่พิจารณา, P_0 คือ ความดันที่ตำแหน่งอ้างอิง, $C_{\sigma Fx}, C_{\sigma Fy}, C_{\sigma Mx}$ และ $C_{\sigma My}$ คือ สัมประสิทธิ์ของแรงและโมเมนต์แบบ rms (root mean square) ซึ่งแสดงถึงการกระจายของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย, ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ, V คือ ความเร็วลมเฉลี่ย, V_H คือ ความเร็วมเฉลี่ยอ้างอิงที่ระดับยอดอาคาร, W, L, H คือ ขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงอาคารตามลำดับ, Z คือ ค่าระยะความสูงตามแกน Z

นอกจากนี้จากการที่กระแสลมเกิดการแยกตัวออกด้านข้างรอบ ๆ อาคาร จะทำให้เกิดระลอกลมขึ้น (Vortex shedding) ซึ่งจำนวนและขนาดระลอกลมขึ้นกับรูปร่างของอาคาร โดยสามารถคำนวณหาค่าความถี่ของการเกิดระลอกลมนี้ได้จากค่า frequency, f_s ซึ่งเท่ากับ

$$f_s = \frac{SV}{b} \quad (7)$$



เมื่อ S คือ Strouhal number มีค่าขึ้นกับรูปร่างของวัตถุ, b คือ ความกว้างด้านปะทะลม (typical cross flow dimension)

2.4 ผลการวิเคราะห์ CFD เทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

2.4.1 สัมประสิทธิ์ของค่าแรงและโมเมนต์

ตารางที่ 2, 3 แสดงค่าเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของแรง ที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD แรงลมที่กระทำต่ออาคารเดี่ยวในงานวิจัยนี้เทียบกับผลงานวิจัยในอดีต [1-3] พบว่าค่าแรงหลักที่กระทำต่ออาคารซึ่งประกอบด้วยแรง F_x และ M_y มีค่าแตกต่างจากงานวิจัยในอดีตประมาณ 1-19% สำหรับสัมประสิทธิ์แรงในแนวแกน x และประมาณ 19-28% สำหรับสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน y (C_{My}) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงในแนวแกน y (C_{Fy}) และ ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์รอบแกน x (C_{Mx}) จะมิต่ำน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลของงานวิจัยในอดีต เนื่องจากเป็นแกนรองที่ไม่มีกระแสลมกระทำต่ออาคารโดยตรง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แบบ rms พบว่ามีค่าต่ำน้อยมากเช่นเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์กรณีกระแสลมกระทำต่ออาคารเดี่ยว ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลหรือก็คือความปั่นป่วนของกระแสลมจะมีค่าต่ำน้อยมาก ภาพที่ 2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแรงและโมเมนต์แบบประวัติเวลาจากเวลา 0-350 วินาที จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่า ช่วง 50 วินาทีแรกข้อมูล จะมีความผันผวนมาก เนื่องจากเป็นสภาวะที่อาคารเริ่มถูกระแสลมกระทำเข้าโดยตรงจากสภาวะหยุดนิ่ง และพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 50 วินาที จึงค่อยลดความผันผวนลง ในงานวิจัยนี้จึงได้ตัดข้อมูลในช่วงเวลา 50 วินาทีแรกออกไป

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรง

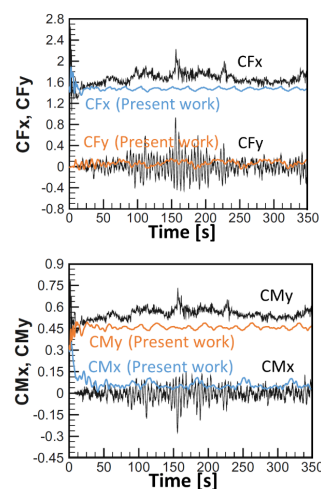
งานวิจัยที่เปรียบเทียบ	C_{Fx}		$C_{\sigma_{Fx}}$	C_{Fy}	$C_{\sigma_{Fy}}$
	value	error			
Braun A.L., Awruch A.M. [2]	1.660	11%	0.076	0.008	0.106
Obasaju [3] – smooth flow	1.490	0.94%	0.060	0.093	0.092
Huang et al. [1] – low turbulence	1.830	19%	0.060	0.006	0.134
Present work (time > 50 s.)	1.476		0.017	0.078	0.027

*ค่า error เทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ = (ค่าอ้างอิง-ค่าจากงานวิจัยนี้)/ค่าอ้างอิง

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์

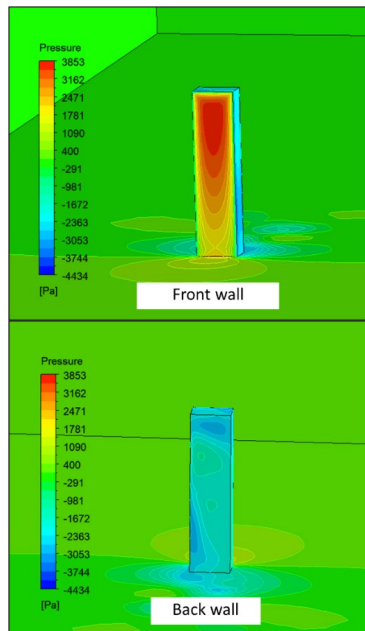
งานวิจัยที่เปรียบเทียบ	C_{Mx}	$C_{\sigma_{Mx}}$	C_{My}		$C_{\sigma_{My}}$
			value	error	
Braun A.L., Awruch A.M. [2]	0.004	0.048	0.570	19.3%	0.038
Obasaju [3] – smooth flow	0.000	0.043	0.640	28%	0.030
Present work (time > 50 s.)	0.052	0.017	0.460		0.012

*ค่า error เทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ = (ค่าอ้างอิง-ค่าจากงานวิจัยนี้)/ค่าอ้างอิง

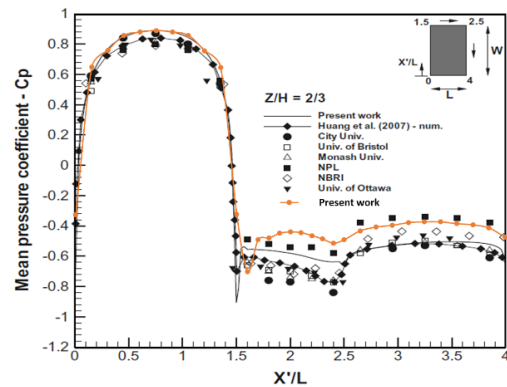


ภาพที่ 2 ประวัติเวลาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่ออาคารเดี่ยวอาคารเดี่ยว

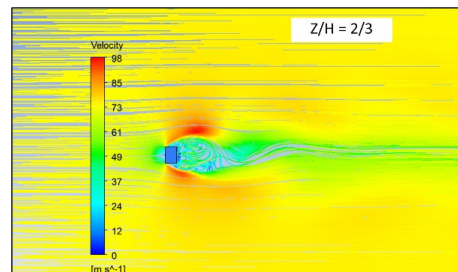
ภาพที่ 3 แสดงถึงแผนภาพเส้นชั้นความดันรอบผิวอาคาร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความดันจะมีค่ามากที่บริเวณหน้าอาคาร และมีค่าสูงขึ้นตามความสูงของอาคาร ซึ่งสอดคล้องกับความจริงที่ว่ากระแสลมกระทำเข้าที่ด้านหน้าของอาคารโดยตรงและความเร็วลมเฉลี่ยมีค่าต่ำสุดที่ผิวดินและค่อย ๆ มีค่ามากขึ้นตามความสูง ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันรอบอาคารที่ระดับความสูง $Z/H = 2/3$ หรือที่ความสูง 120 เมตร แสดงดังในภาพที่ 4 โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ [1, 2] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่บริเวณด้านหน้าอาคาร ($0 < X'/L < 1.5$) ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตเป็นอย่างดี ส่วนบริเวณด้านข้างอาคาร ($1.5 < X'/L < 2.5$) ได้ผลสูงกว่างานวิจัยในอดีตเล็กน้อย และส่วนบริเวณด้านหลังอาคาร ($2.5 < X'/L < 4$) ได้ผลสอดคล้องใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ



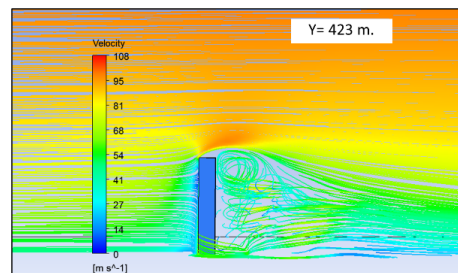
ภาพที่ 3 ความดันรอบอาคาร



ภาพที่ 4 สัมประสิทธิ์ของแรงดันรอบอาคารที่ระดับความสูง 120 เมตร



a) ภาพตัดขวางแนวระนาบนอนที่ความสูง (2/3)H



b) ภาพตัดขวางแนวระนาบตั้งที่กึ่งกลางอาคาร

ภาพที่ 5 เส้นการไหลของกระแสลมกรณีอาคารเดี่ยว

2.4.2 เส้นการไหลของกระแสลม (Stream line)

ภาพที่ 5 แสดงเส้นการไหลของกระแสลมในแนว (a) ระนาบตัดขวางแนวนอนที่ความสูง (2/3)H และ (b) แนวระนาบตัดขวางกึ่งกลางอาคาร จะเห็น

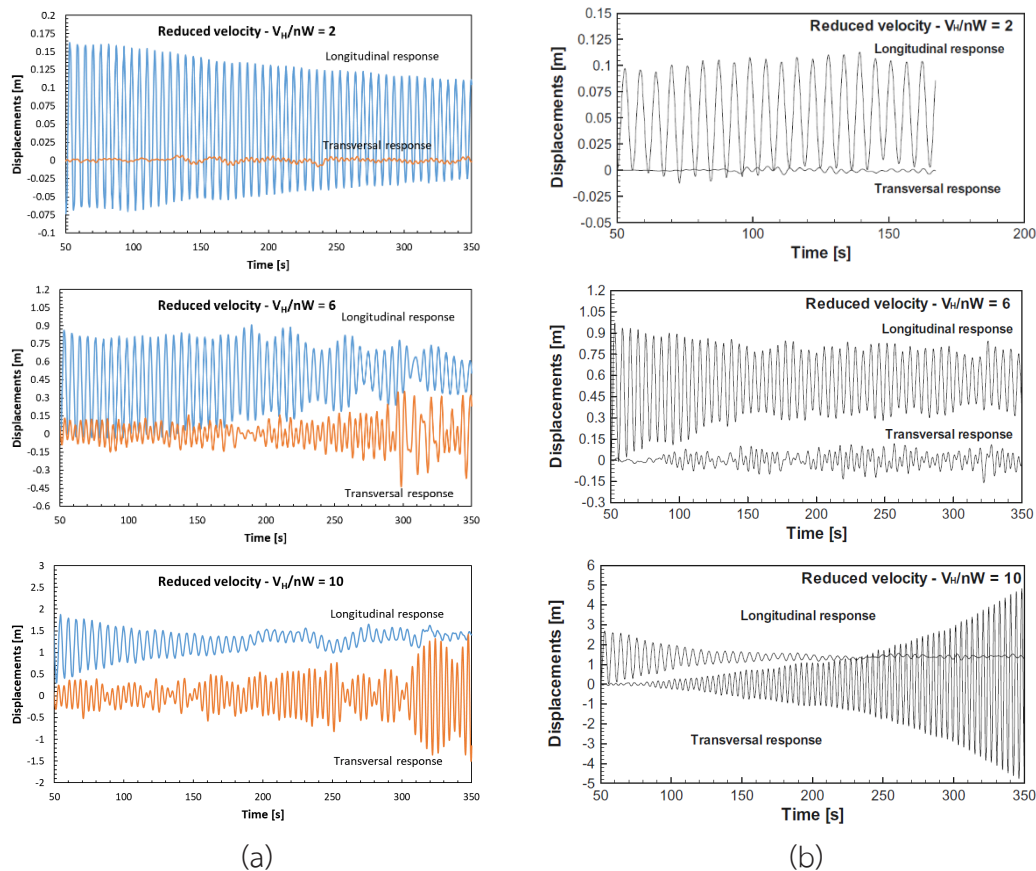
ได้ว่าเมื่อกระแสลมไหลปะทะกับอาคารจะเกิดการเลี้ยวเบนออกแล้วไหลผ่านทางด้านข้างอาคาร และเกิดเป็นกระแสรอบกวอยู่บริเวณด้านข้างและหลังอาคารบางส่วน ซึ่งทำให้โครงสร้างอาคารเกิดการสั่นไหวทั้งในแนวทิศทางการกระแสลมและตั้งฉากกับกระแสลม และเมื่อพิจารณาจากภาพตัดขวางในแนวดังจะเห็นได้ว่าทางด้านหน้าของอาคารที่ระดับความสูงต่ำ ๆ กระแสลมจะพยายามวนกลับเมื่อปะทะอาคาร ส่วนที่ระดับความสูงอาคารสูง ๆ กระแสลมจะพยายามไหลข้ามอาคารไป ส่วนทางด้านหลังอาคาร กระแสรอบกลมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความสูง

2.4.3 การเคลื่อนตัวที่ระดับยอดอาคาร

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอาคารโดยวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างอาคารภายใต้ความเร็วลมที่สอดคล้องกับความเร็วลมลดรูปค่าต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวทั้งการเคลื่อนตัวในแนวทิศทางการลมและการเคลื่อนตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม ทั้งนี้การวิเคราะห์ไม่ได้พิจารณาผลของตัวหน่วง

ภาพที่ 6 แสดงค่าการเคลื่อนตัวที่ระดับยอดอาคารสำหรับค่าความเร็วลมลดรูป เท่ากับ 2, 6, 10 โดยเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยในอดีต [2] ซึ่งพบว่าการเคลื่อนตัวในทิศทางตามกระแสลมนั้นมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น และมีค่าแอมพลิจูดของการตอบสนองสูงขึ้นตามความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) ที่เพิ่มขึ้น หรือก็คือเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารตามกระแสลมก็เพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนการเคลื่อนตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมที่ค่าความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) = 2 และ 6 พบว่าแอมพลิจูดของการตอบสนองมีค่าน้อย แต่ที่ค่าความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) ประมาณ = 10 พบว่าค่าการเคลื่อนตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน เป็นผลมาจากความถี่ในการสั่นของอาคารเนื่องจากแรงลมมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของอาคาร จึงทำให้เกิดการสั่นพ้องแบบกำทอน (Resonance) ในทิศทางที่ตั้งฉากกับกระแสลม หรือที่เรียกว่าเกิดพฤติกรรม lock-in



ภาพที่ 6 การเคลื่อนตัวที่ระดับยอดอาคารภายใต้กระแสลมความเร็วต่าง ๆ

(a) ผลจากงานวิจัยนี้ (b) ผลจากงานวิจัยในอดีต [2]

2.5 สรุปผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ CFD

จากการศึกษาโดยการจำลองอาคารขนาด 1:1 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ CFD เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของอาคารสูงเมื่อถูกแรงลมกระทำ ได้ผลใกล้เคียงเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่งเมื่อเทียบกับผลงานวิจัยในอดีต ทั้งนี้อาจได้ผลที่มีค่าแตกต่างไปบ้าง อาจเนื่องจากสาเหตุบางประการ เช่น ระยะเวลา Δt ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่แตกต่างกัน หรือขนาดของเอลิเมนต์ก็มีผลต่อความละเอียดของ

ผลการวิเคราะห์เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดละเอียดเล็กมากๆ หรือระยะเวลาช่วงการวิเคราะห์ (Δt) ที่เล็กมาก มีผลต่อข้อจำกัดความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่ใช้งาน เวลาที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งจากค่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยในอดีต ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โปรแกรมสำเร็จรูปทาง CFD และขั้นตอนกระบวนการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้าง อยู่ในเกณฑ์ที่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งจะนำไปใช้วิเคราะห์ผลของแรงลมที่กระทำต่อ



อาคารสูงกรณีที่มีอาคารอื่นบดบังกระแสลมในลำดับถัดไป

3. การศึกษาผลกระทบจากการบดบังของอาคารที่อยู่ด้านหน้า

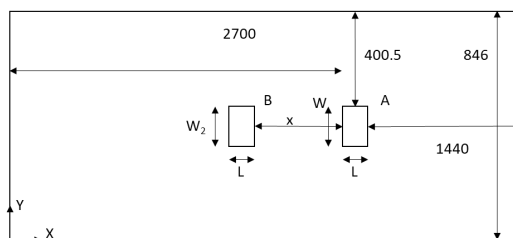
ในลำดับถัดไปได้ใช้แบบจำลองอาคารเดิมมาทำการวิเคราะห์ CFD กรณีศึกษาผลของกระแสลมที่กระทำต่ออาคารสูงโดยมีอาคารอื่นบดบังด้านหน้า โดยพิจารณาผลของความสูงอาคารที่บดบังและระยะห่างของการบดบังค่าต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การสร้างแบบจำลองอาคารหลักและอาคารบดบัง

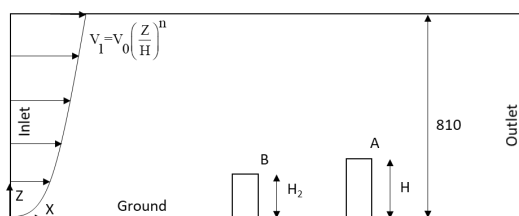
งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองอาคารสูงขนาด 1:1 โดยอาคารหลักที่ทำการศึกษาค่าแรงลมที่กระทำต่ออาคารมีขนาดเท่าอาคารเดิมที่ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 ในที่นี้เรียกแทนอาคาร A ซึ่งมีขนาดความสูง (H) = 180 เมตร, กว้าง (W) = 45 เมตร, ความยาว (L) = 30 เมตร ส่วนอาคารที่มาบดบังกระแสลมด้านหน้าเรียกแทนอาคาร B มีขนาดความกว้างยาวเท่าอาคาร A คือกว้าง 45 เมตร และยาว 30 เมตร แต่ปรับเปลี่ยนค่าความสูงอาคารบดบัง H_2 ที่ความสูงต่างๆ เป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เท่าของความสูงอาคาร A และมีตำแหน่งของอาคาร B ที่บดบังด้านหน้าอาคาร A ที่ระยะห่างต่างๆ ดังแสดงค่าในตารางที่ 3 โดยการวิเคราะห์ CFD อยู่ในขอบเขตของการคำนวณ (Computational domain) ขนาดความสูง 810 เมตร กว้าง 846 เมตร และยาว 4170 เมตร ดังแสดงรายละเอียดตำแหน่งแบบจำลองอาคารและขนาดขอบเขตการวิเคราะห์

ในภาพที่ 7 ซึ่งมีทั้งหมด 13 กรณี เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความสูงอาคารบดบัง (B) ทั้ง 4 ขนาด ทำให้มีจำนวนกรณีศึกษาในการวิเคราะห์ simulation CFD ทั้งหมด = 52 กรณี เพื่อศึกษาค่าแรงกระทำที่ฐานอาคาร (Base Shear) โมเมนต์กระทำที่ฐานอาคาร (Base Moment) และแรงดัน (Pressure) ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าอาคาร เมื่อมีอาคารบดบังความสูงต่างๆ และระยะห่างการบดบังต่างๆ

สมบัติเชิงกลของโครงสร้างอาคารอ้างอิงตามอาคารในมาตรฐาน CAARC เช่นเดิมคือ มีค่าความหนาแน่นมวลอาคาร, Specific mass, = 160 Kg/m^3 , Young's modulus $2.3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, Poisson's ratio 0.25 และในการวิเคราะห์ส่วนนี้พิจารณาค่าความหน่วง, Damping ratio = 1%



a) ภาพ plan อาคาร



b) ภาพ elevation อาคาร

ภาพที่ 7 ขนาดของแบบจำลองอาคารและขอบเขตการจำลองที่ทำการศึกษา (หน่วย: เมตร)

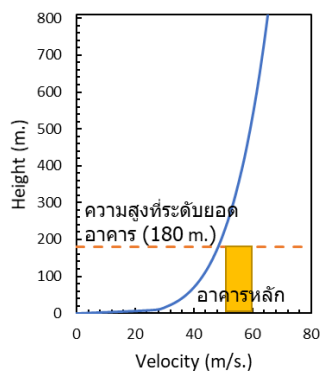
ตารางที่ 3 กรณีสึกษาตำแหน่งระยะห่าง (x) ของอาคารบดบังกับอาคารหลัก

กรณี	x (m)	u = x/L	กรณี	x (m)	u = x/L
1	30	1	8	660	22
2	90	3	9	810	27
3	150	5	10	1110	37
4	240	8	11	1410	47
5	330	11	12	1710	57
6	420	14	13	2010	67
7	510	17			

*u นิยามเป็น ระยะห่างการบดบังแบบไร้หน่วย = x/L

3.2 คุณสมบัติแบบจำลองกระแสลม

แบบจำลองกระแสลมที่ใช้เป็นแบบชั้นขอบเขตความเร็ว (Boundary layer velocity profile) เช่นเดิมตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) โดยใช้ค่า $\alpha = 0.2$ และความเร็วลมที่ระดับยอดอาคาร (180 m) อ้างอิงจากค่าความเร็วลมไร้หน่วย = 6 ซึ่งมีค่าความเร็วเฉลี่ย = 48.27 m/s สามารถแสดงค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ (Velocity Profile) ดังในภาพที่ 8



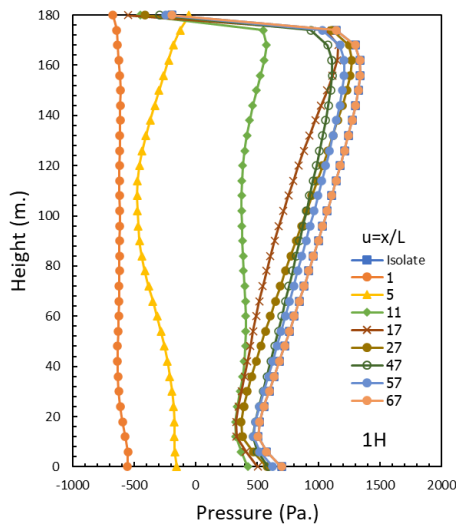
ภาพที่ 8 ความเร็วลมที่ระดับความสูงต่าง ๆ (Velocity Profile)

คุณสมบัติเชิงกลของอากาศใช้เท่าเดิมตามการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 คือ ค่าความหนาแน่นมวลอากาศ, Specific mass = 1.25 Kg/m^3 , Dynamic viscosity $7.03 \times 10^{-2} \text{ Ns/m}^2$ และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation (LES) จำลองมวลอากาศด้วยเอลิเมนต์แบบ tetrahedral จำนวนทั้งสิ้นประมาณ 688,061 ชิ้นส่วน (มาจากการกำหนดขนาดชิ้นส่วนเอลิเมนต์อากาศที่ 3 เมตร อัตราการขยาย 1.125) ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นแตกต่างกันแล้วแต่กรณีเนื่องจากอาคารที่บดบัง (อาคาร B) มีขนาดที่แตกต่างกัน

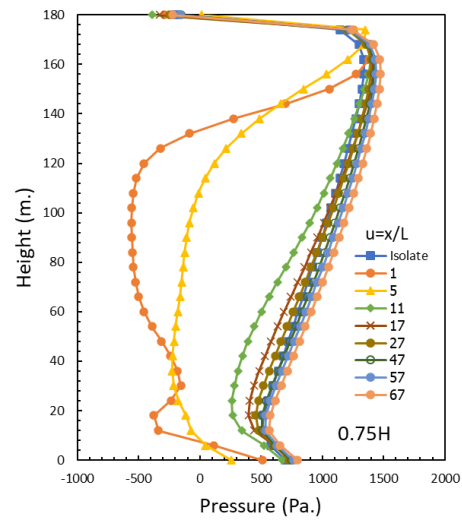
เงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ CFD กำหนดในลักษณะเดียวกันกับที่วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 คือ กำหนดให้มีแรงลมเข้าจากทางด้านหน้าอาคารในลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยแปรผันตามความสูง กำหนดความดันที่จุดไหลออกเท่ากับศูนย์ สำหรับค่าระยะห่างเวลา (time step) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ CFD ใช้ค่าที่ละเอียดขึ้นกว่าเดิมคือใช้ค่า $\Delta t = 0.1$ วินาที

4. ผลการวิเคราะห์ CFD กรณีมีอาคารบดบังกระแสลมที่กระทำกับอาคารหลัก

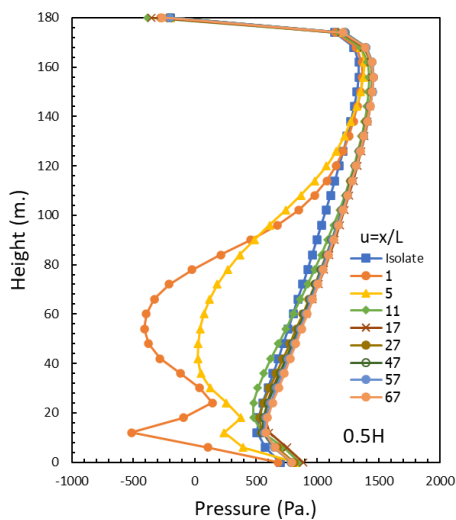
ผลการวิเคราะห์ค่าแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลักด้านหน้าที่ตำแหน่งกึ่งกลางอาคาร เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีของลมกระทำต่ออาคารเดี่ยวไร้การบดบัง (กรณี isolate) และกรณีที่ถูกลบดบังด้วยอาคารขวางด้านหน้ากรณีต่าง ๆ ได้ถูกเลือกมาแสดงในภาพที่ 9 ประกอบด้วยกรณีที่มีระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = x/L = 1, 5, 11, 17, 27, 47, 57, 67$ สำหรับอาคารบดบังขนาดความสูง $1H, 0.75H, 0.5H$ และ $0.25H$ ในภาพที่ 9(a)-(d) ตามลำดับ



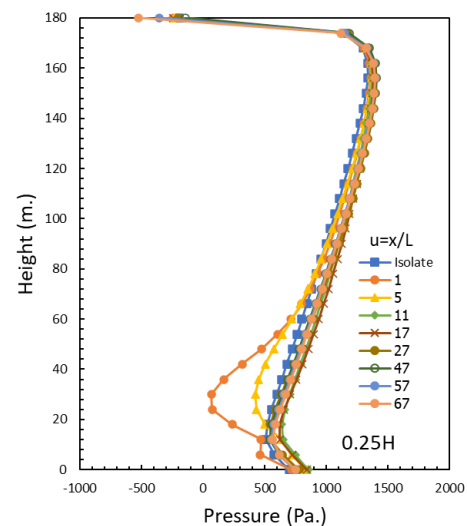
a) กรณีอาคารบดบังสูง 1H



b) กรณีอาคารบดบังสูง 0.75H



c) กรณีอาคารบดบังสูง 0.5H



d) กรณีอาคารบดบังสูง 0.25H

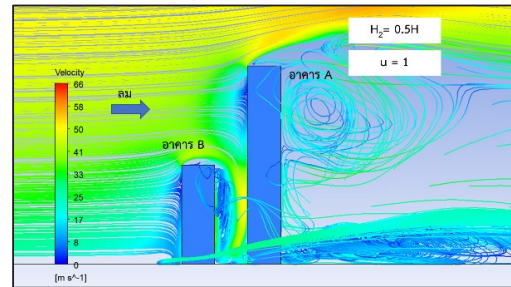
ภาพที่ 9 แรงดัน (Pressure) บริเวณกึ่งกลางด้านหน้าอาคารหลักที่ระยะความสูงต่างๆ

โดยแกน y เป็นความสูงของอาคารที่ทำการศึกษ แกน x เป็นค่าแรงดัน (Pressure) ด้านหน้าที่กึ่งกลางอาคาร จากผลการวิเคราะห์พบว่า โดยทั่วไปเมื่ออาคารบดบังยังอยู่ใกล้อาคารหลัก จะยังทำให้แรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลักลดลงอย่างมาก

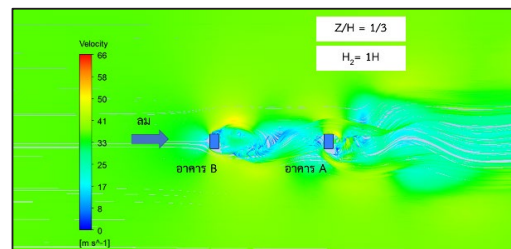
โดยเฉพาะเมื่อค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u < 11$ ยกเว้นกรณีอาคารบดบังสูง 1H เมื่อค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u ตั้งแต่ 11 ขึ้นไป (ระยะห่างอาคารบดบังตั้งแต่ประมาณ 11 เท่าของขนาดอาคารหลักในทิศทางตามกระแสลม) ค่าแรงดันลมที่กระทำต่อ

ด้านหน้าอาคารหลักมีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีไร้การ
บดบัง สำหรับกรณีที่อาคารบดบังสูง $1H$ ค่าระยะ
ห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 47$ เท่าขึ้นไป ยังคงมีผล
การบดบังให้แรงดันลมที่กระทำกับอาคารหลักลดลง
เล็กน้อย เพราะเมื่อความสูงของอาคารบดบัง H_2
ลดลง ค่าแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารหลัก ที่ตำแหน่ง
ความสูงมากกว่าอาคารที่บดบัง จะมีค่าใกล้เคียง
กับกรณีอาคารหลักที่ไร้การบดบัง ซึ่งแสดงว่า
ผลกระทบของแรงดันลมที่เปลี่ยนแปลงแตกต่าง
จากกรณีที่ไม่มีอาคารบดบัง (Isolate) ส่วนใหญ่จะ
เกิดในบริเวณที่ความสูงต่ำกว่า H_2

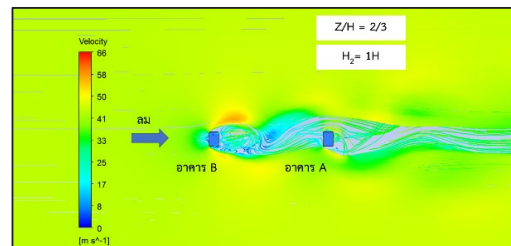
จากภาพที่ 9(c) มีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าค่าแรง
ดันที่ผิวอาคารหลักของกรณีอาคารบดบังมีความสูง
น้อยกว่าอาคารหลักโดยเฉพาะกรณีของอาคารบดบัง
สูง $0.5H$ และระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 1$
ที่ตำแหน่งระดับความสูง 12 เมตร พบค่าแรงดันที่
ผิวอาคารหลักติดลบ (แรงดูด) มากกว่ากรณีอื่น ๆ
ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นค่าบวก (แรงกด) สาเหตุเป็นเพราะ
ว่า เมื่อกระแสลมพัดผ่านด้านบนของอาคารบดบัง
(B) เข้าปะทะอาคารหลัก (A) ทำให้กระแสลมไหล
สะท้อนลงมาตามช่องว่างระหว่างอาคาร A และ B
ดังแสดงในภาพที่ 10 เป็นผลทำให้ที่ ช่วงตำแหน่ง
ความสูงระดับประมาณ 12 เมตร เกิดเป็นแรงดูดที่
ผิวหน้าอาคาร A พฤติกรรมในลักษณะเดียวกัน
สามารถพบได้ในกรณีอาคารบดบังสูง $0.25H$ และ
 $0.75H$ เช่นกันที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วยประมาณ
ไม่เกิน $u \leq 5$



ภาพที่ 10 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่มี
อาคารบดบังสูง $0.5H$ ด้านหน้า
ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 1$



a) ภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่ง
ความสูง $Z/H = 1/3$



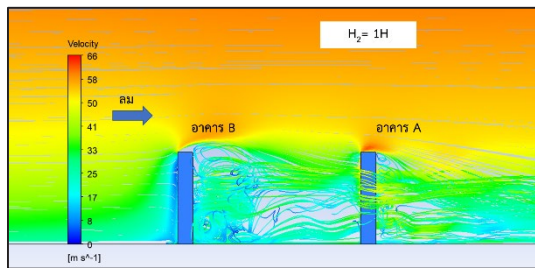
b) ภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่ง
ความสูง $Z/H = 2/3$

ภาพที่ 11 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่มี
อาคารบดบังสูง $1H$ ด้านหน้าที่ระยะห่าง
การบดบังไร้หน่วย, $u = 11$

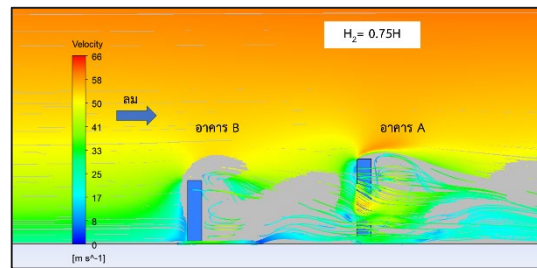


ตัวอย่างเส้นทางการไหลของกระแสลมในกรณีที่มีอาคารบดบังสูง $1H$ ด้านหน้าที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 11$ ดังแสดงในภาพที่ 11(a) และ 11(b) สำหรับภาพตัดในแนวระนาบนอนที่ตำแหน่งความสูง $Z/H = 1/3$ และ $Z/H = 2/3$ ตามลำดับ โดยในภาพ แสดงการไหลของกระแสลมไหลเข้าจากทางด้านซ้ายมือของรูป ผ่านอาคารที่บดบัง

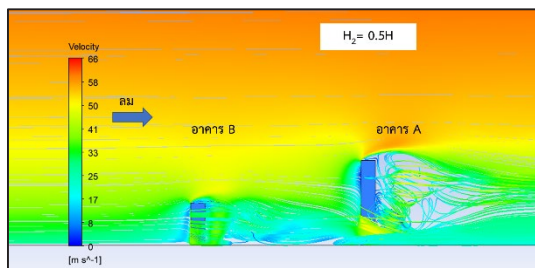
และอาคารหลักแล้วไหลออกทางด้านขวาของรูป ส่วนภาพตัดแนว ระนาบตั้งในกรณีที่มีอาคารบดบังด้านหน้าสูง $1H, 0.75H, 0.5H, 0.25H$ ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 11$ และกรณีที่ไร้อาคารบดบังแสดงในภาพที่ 12(a)-(e) ตามลำดับ และภาพที่ 13 แสดงเส้นทางการไหลของกระแสลมในแบบภาพ 3 มิติ



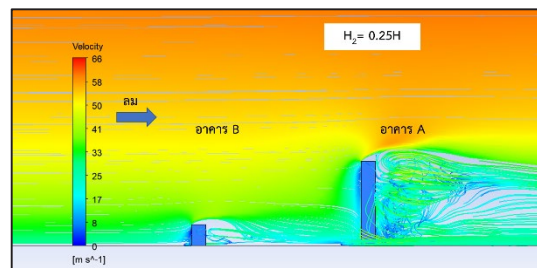
a) กรณีอาคารบดบังสูง $1H$



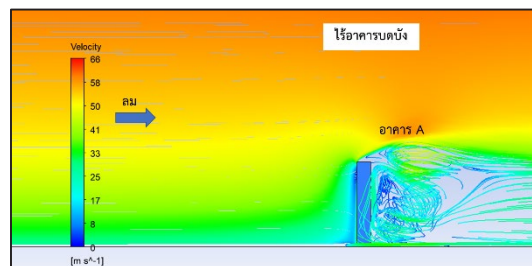
b) กรณีอาคารบดบังสูง $0.75H$



c) กรณีอาคารบดบังสูง $0.5H$

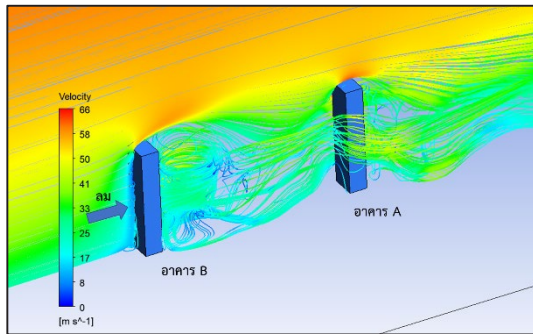


d) กรณีอาคารบดบังสูง $0.25H$



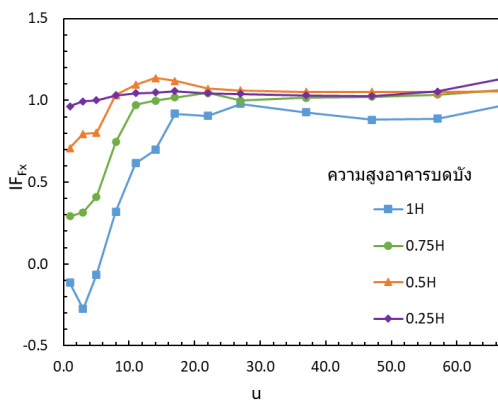
e) กรณีไร้อาคารบดบังสูง

ภาพที่ 12 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่มีอาคารบดบังสูง $1H, 0.75H, 0.5H, 0.25H$ และไร้อาคารบดบังด้านหน้าที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 11$

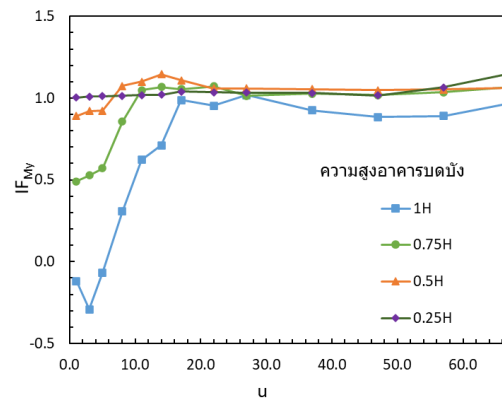


ภาพที่ 13 เส้นกระแสการไหลของลมใน 3 มิติ

นอกจากการพิจารณาจากค่าความดันที่กระทำด้านหน้าอาคารหลักแล้ว การเปรียบเทียบผลกระทบจากการบดบังกระแสลมต่อค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานอาคารหลักในกรณีต่าง ๆ จะใช้การพิจารณาจากค่าตัวประกอบการบดบัง (Interference Factors, IF) นิยามเท่ากับค่าสัดส่วนของผลค่าแรงเฉือนที่เกิดในอาคารหลักกรณีที่มีอาคารบดบังด้านหน้าต่อผลของค่าแรงเฉือนหรือโมเมนต์ที่เกิดในอาคารหลักเดี่ยว ๆ โดยไม่ถูกบดบัง ดังแสดงผลในภาพที่ 14



a) แรงเฉือนที่ฐานอาคารหลัก IF_{Fx}



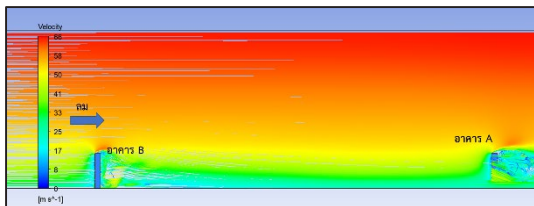
b) โมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก IF_{My}

ภาพที่ 14 ค่าตัวประกอบการบดบังของค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก

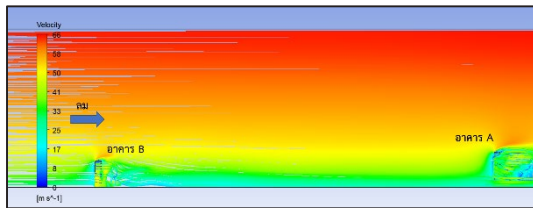
จากภาพที่ 14 แกน y เป็นค่าตัวประกอบการบดบังของแรงเฉือนที่ฐานอาคารในแนวแกน x (IF_{Fx}) และโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักรอบแกน y (IF_{My}) สำหรับภาพที่ 14 (a) และ 14 (b) ตามลำดับ และแกน x เป็นระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u=x/L$, ผลการวิเคราะห์แสดงแยกแต่ละกรณีของความสูงของอาคารที่บดบัง $H_2 = 1H, 0.75H, 0.5H$ และ $0.25H$ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ พบว่าเมื่ออาคารบดบังอยู่ใกล้และมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงอาคารหลัก ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักจะถูกลดทอนลงอย่างมากโดยผลการลดทอนค่าแรงเฉือนและโมเมนต์กระทำที่ฐานอาคารหลักนี้จะน้อยลงเมื่อ อาคารบดบังอยู่ห่างไกลมากขึ้น โดยเมื่อระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u , มีค่าประมาณ 20 ขึ้นไป (ระยะห่าง 20 เท่าของขนาดอาคารหลัก



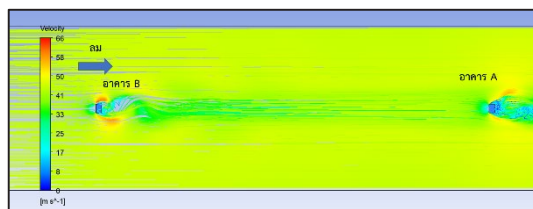
ในทิศทางตามกระแสลม) ค่าตัวประกอบการบดบัง (IF_{Fx} , IF_{My}) มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าผลการบดบังอาคารมีค่าค่อนข้างน้อยมาก อย่างไรก็ตามกรณีที่อาคารบดบังมีความสูง H_2 เท่ากับอาคารหลัก (กรณีความสูงบดบัง $1H$) แม้ระยะห่างการบดบังจะไกลมากถึง 67 เท่าของขนาดอาคารหลักในทิศทางตามกระแสลม ($u = 67$) ค่า IF ยังมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.9 คาดว่ามีสาเหตุมาจากกระแสลมที่พัดผ่านอาคารบดบัง (อาคาร B) ส่วนที่ไหลเข้าอาคารมีความเร็วลมมากกว่ากรณีอื่น ๆ จึงควรต้องมีระยะทางที่ไกลกว่านี้ เพื่อลดผลกระทบจากแรงลม อีกทั้งการเกิดระลอกลมที่ด้านหลังอาคารบดบังของกรณีอาคารบดบังสูง $1H$ ก่อวนกระแสลมที่จะเข้าปะทะกับอาคารหลัก (อาคาร A) มีมากกว่ากรณีอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 15 (ภาพเปรียบเทียบตัวอย่างของกรณีอาคารบดบังสูง $1H$ เทียบกับกรณีสูง $0.75H$) นอกจากนี้เมื่อค่า $u = 27$ ค่า IF กรณีอาคารบดบังสูง $1H$ มีค่าเข้าใกล้ 1 คาดว่ามีสาเหตุมาจากเกิดการปั่นป่วนของกระแสลมพอดีที่ไปลดผลกระทบต่อค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานอาคารหลัก ทำให้ค่าแรงมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ไร้การบดบังพอดี



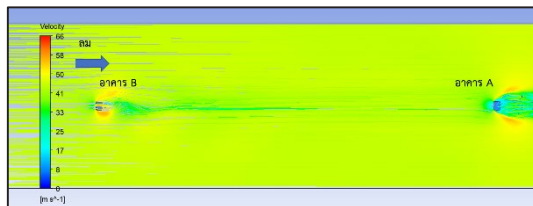
a) ภาพตัดขวางแนวระนาบตั้งที่กึ่งกลางอาคารกรณีอาคารบดบังสูง $1H$



b) ภาพตัดขวางแนวระนาบตั้งที่กึ่งกลางอาคารกรณีอาคารบดบังสูง $0.75H$



c) ภาพตัดขวางแนวระนาบแนวระนาบนอนที่ความสูง $(2/3)H$ กรณีอาคารบดบังสูง $1H$



d) ภาพตัดขวางแนวระนาบแนวระนาบนอนที่ความสูง $(2/3)H$ กรณีอาคารบดบังสูง $0.75H$

ภาพที่ 15 เส้นการไหลของกระแสลมในกรณีที่อาคารบดบังสูง $1H$ และ $0.75H$ ที่ระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = 67$

นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตว่า ถ้าความสูงอาคารบดบังลดลง จะมีค่า IF ที่สูงขึ้น หมายความว่า ยิ่งอาคารบดบังเตี้ยลง ผลการบดบังแรงลมที่กระทำต่ออาคารหลักจะลดลง (ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่

ฐานอาคารหลักมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกรณีอาคารที่ไร้การบดบัง)

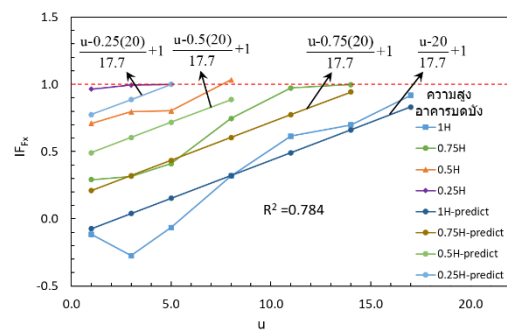
จากภาพที่ 14 พบว่าสำหรับกรณีที่อาคารบดบังมีความสูง 1H เมื่อค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u มีค่ามากกว่าประมาณ 17 และ 20 ค่า IF ของโมเมนต์และแรงเฉือนที่ฐานอาคารจะมีค่าประมาณ 1 ตามลำดับ ค่า u ดังกล่าวนิยามให้เป็นค่า x_0 ซึ่งหมายถึงระยะห่างการบดบังไร้หน่วยที่ไม่มีผลกระทบต้ออาคารหลักสำหรับกรณีอาคารบดบังสูง 1H, $x_0 = 20$ สำหรับ IF_{Fx} และ $x_0 = 17$ สำหรับ IF_{My} และเมื่อความสูงของอาคารบดบังลดลง (0.75H, 0.5H และ 0.25H) ระยะห่างการบดบังที่ไม่มีผลกระทบต้ออาคารหลัก มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของการบดบัง (nx_0 ; $n = 1, 0.75, 0.5, 0.25$)

จากภาพที่ 14 ในช่วงระยะห่างการบดบังไร้หน่วยที่ส่งผลกระทบต่ออาคารหลัก ($u < x_0$) แนวโน้มของค่า IF มีลักษณะอาจประมาณเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้ จึงใช้ข้อมูลค่า IF ในช่วงดังกล่าวมาประมาณหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างง่ายดังสมการที่ 8

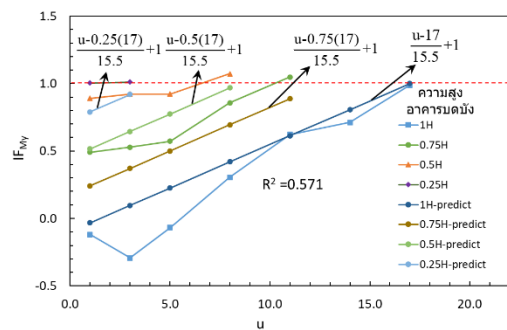
$$IF = \frac{u - nx_0}{k} + 1 \quad (8)$$

เมื่อ IF คือ ค่าตัวประกอบการบดบัง, u คือ ค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, n คือ จำนวนเท่าของความสูงอาคารบดบังต้ออาคารหลัก, k คือ ค่าคงที่โดยใช้หลักทางสถิติเพื่อวิเคราะห์หาค่า k ที่ทำให้ผลการประมาณค่ามี error น้อยที่สุดด้วยวิธี Least

square method พบว่าได้ค่า k สำหรับสมการค่าตัวประกอบการบดบังของแรง $IF_{Fx} = 17.7$ โดยมีค่า $R^2 = 0.784$ และได้ค่า k สำหรับค่าตัวประกอบการบดบังของแรง $IF_{My} = 15.5$ โดยมีค่า $R^2 = 0.571$



a) IF_{Fx} ของแรงเฉือนที่ฐานอาคารหลัก



b) IF_{My} ของโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลัก

ภาพที่ 16 IF_{Fx} , IF_{My} จากการวิเคราะห์ CFD และการประมาณค่าตามสมการ (8)

นำสมการที่ 8 มาคำนวณค่าตัวประกอบการบดบังที่ระยะบดบังต่าง ๆ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ CFD แสดงได้ดังภาพที่ 16(a) สำหรับค่าตัวประกอบการบดบังของแรง IF_{Fx} และภาพที่ 16(b) สำหรับค่าตัวประกอบการบดบังของโมเมนต์ IF_{My}



5. สรุปผล

1. จากการวิเคราะห์ CFD ของอาคารเดี่ยวที่ไม่มีการบดบังในหัวข้อที่ 2 พบว่าได้ผลใกล้เคียงกับผลงานวิจัยในอดีต ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมที่กระทำต่ออาคารในทิศทางหลัก มีค่าใกล้เคียงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ค่าความเร็วลมที่ต่างกันให้ผลการตอบสนองอาคารต่างกัน การเคลื่อนตัวในทิศทางตามกระแสลมจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และมีค่าแอมพลิจูดของในทิศทางหลัก มีค่าใกล้เคียงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ค่าความเร็วลมที่ต่างกันให้ผลการตอบสนองอาคารต่างกัน การเคลื่อนตัวในทิศทางตามกระแสลมจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และมีค่าแอมพลิจูดของการตอบสนองสูงขึ้นตามค่าความเร็วลมเฉลี่ยหรือค่าความเร็วลมลดรูป (Reduced Velocity) ที่เพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมมีค่าน้อย แต่หากความเร็วลมหรือความเร็วลมลดรูปมีค่าความเร็วที่ทำให้อาคารเกิดการสั่นไหวด้วยความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของอาคารจะทำให้เกิดพฤติกรรม lock-in ซึ่งอาคารจะสั่นไหวเพิ่มขึ้นอย่างรุนแรง เนื่องจากเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) กับความถี่ธรรมชาติของอาคาร

2. จากผลการวิเคราะห์ความดันลมด้านหน้าอาคารหลักกรณีที่มีอาคารบดบัง พบว่า เมื่อค่าระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, $u = x/L$, ประมาณ 11 ขึ้นไป ค่าความดันด้านหน้าอาคารหลักค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าของกรณีที่ไม่มีอาคารบดบัง (Isolate) และพบว่ายิ่งความสูงของอาคารที่มาบดบัง (H_2) ลดลง

ค่าแรงดันลมด้านหน้าของอาคารหลักที่ตำแหน่งสูงกว่าอาคารบดบัง, H_2 , จะเข้าใกล้ผลของแรงดันลมหน้าอาคารหลักในกรณีที่ไม่มีอาคารบดบัง (Isolate) ซึ่งแสดงว่าผลกระทบของแรงดันลมที่ด้านหน้าอาคารหลักจากอาคารที่บดบัง ส่วนใหญ่จะเกิดในบริเวณที่ระดับความสูงต่ำกว่าค่าความสูงของอาคารที่มาบดบัง (H_2)

3. จากผลการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานของอาคารหลักในกรณีที่ถูกรบกวนโดยอาคารอื่น บดบังด้านหน้า ในรูปแบบของค่าตัวประกอบการบดบัง (IF) พบว่าเมื่อระยะห่างการบดบังไร้หน่วย, u , ประมาณ 20 ขึ้นไป ผลของการบดบังหลังลมที่มีต่ออาคารหลักจะลดลงเหลือน้อยมาก ประมาณไม่ถึง 10% ของกรณีที่ไร้การบดบัง (หากอาคารบดบังสูงเท่ากับอาคารหลัก (ความสูงบดบัง $H_2 = 1H$) ค่า IF ที่ระยะ u ใกล้สุดมีค่าประมาณ 0.9) นอกจากนี้ยังอาคารบดบังเตี้ยลงเท่าไร ผลการบดบังแรงลมที่มีต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักยิ่งน้อยลง และพบว่าค่าตัวประกอบการบดบังของแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารหลักมีรูปแบบในลักษณะเดียวกัน

4. สมการเส้นตรงเพื่อประมาณค่าตัวประกอบการบดบังของแรงเฉือนและโมเมนต์ที่ฐานอาคารสำหรับการบดบังอาคารด้านหน้าที่ความสูงต่าง ๆ และระยะห่างอาคารต่าง ๆ จนถึงระยะ x_0 ดังแสดงใน สมการที่ (8) ซึ่งมีค่า R^2 ประมาณ 0.784 และ 0.571 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าพอยอมรับได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Huang S, Li Q S, and Xu S (2007). Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. *Journal of Constructional Steel Research*, 63: 612–627.
- [2] Braun A L, and Awruch A M (2009). Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. *Computers and Structures*, 87: 564–581.
- [3] Obasaju E D (1992). Measurement of forces and base overturning moments on the CAARC tall building model in a simulated atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40: 103–126.
- [4] Thepmongkorn S (2004). High frequency force balance model tests for a prediction of wind-induced forces and responses of buildings. *The 9th National Convention on Civil Engineering*, Phetchaburi, pp.120-125.
- [5] Bairagi A K, and Dalui S K (2014). Optimization of Interference Effects on High-Rise Buildings for Different Wind Angle Using CFD Simulation. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14: 39-49.
- [6] Dalui S K, Kar R, and Hajra S (2015). Interference Effects on Octagonal Plan Shaped Tall building under Wind - A Case Study. *SCIENTIFIC COOPERATIONS WORKSHOPS ON ENGINEERING BRANCHES*, Istanbul.
- [7] Dagnew A K, and Bitsuamlak G T (2010). LES evaluation of wind pressures on a standard tall building with and without a neighboring building. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*.
- [8] Dagnew A K, Bitsuamalk G T, and Merrick R (2009). Computational evaluation of wind pressures on tall buildings. *11th Americas Conference on Wind Engineering*, San Juan.
- [9] Desai A K, Sevalia J K, and Vasanwala S A (2014). Wind Interference Effect on Tall Building. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8: 656-662
- [10] Mittal A K, Ghosh D, Behera S, Siddiqui I A, and Dharmshaktu D S (2013). WIND FLOW SIMULATION IN THE VICINITY OF TALL BUILDINGS THROUGH CFD. *The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Chennai.



- [11] Kheyari P, and Dalui S K (2015). Estimation of Wind Load on a Tall Building under Interference Effects: A Case Study. Jordan Journal of Civil Engineering, 9.
- [12] Roy A K, Verma S K, Lather S, and Sooda M (2014). ABL airflow through
- CFD simulation on tall building of square plan shape. 7th National Conference on Wind Engineering, Patiala.
- [13] Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council (CAARC). <https://uia.org/s/or/en/1100046837>