

การเปรียบเทียบแรงลมโดยรวมของอาคารสูงโดยวิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลอง กับวิธีการรวบรวมผลของแรงดัน

A Comparison of Overall Wind Load of Tall Buildings by High Frequency Force Balance and High Frequency Pressure Integration

วศิน แท่งทอง^{1*} วิโรจน์ บุญญภิญโญ² และ จิรวัดน์ จันทร์เรือง³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: ¹suguswasin@gmail.com, ²bvirote@engr.tu.ac.th, ³jirawat_ju@mutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแรงลมโดยรวมที่กระทำกับอาคารสูง โดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมด้วยวิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลอง (High Frequency Force Balance, HFFB) และวิธีการวัดความดัน ร่วมกับการใช้เทคนิคการรวมผลของความดันที่เรียกว่า วิธีการรวบรวมผลของแรงดัน (High Frequency Pressure Integration, HFPI) การศึกษาจะนำเสนอผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบในรูปของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมไร้หน่วย โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐาน และแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมด (Generalized Wind Force) ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์โดยใช้โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองสำหรับการทดสอบทั้งสองวิธีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับวิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์ที่ฐานของแบบจำลองกลับให้ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมด ซึ่งต่างกับวิธีการรวบรวมผลของแรงดันที่ไม่ว่าจะใช้การวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองหรือแรงลมเชิงโหมดก็ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: วิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลอง, วิธีการรวบรวมผลของแรงดัน, การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม, การวิเคราะห์แรงลม, ผลของแรงลมต่ออาคารสูง

Abstract

This research is to study the overall wind load acting on tall buildings by the high frequency force balance (HFFB) and high frequency pressure integration (HFPI). This study present the results of analysis and comparison in terms of non-dimensional aerodynamic coefficients, base overturning moments and Equivalent Static Wind Load (ESWL). The findings from the base

moment analysis were compared with the generalized wind force analysis. The results by the base moment analysis demonstrate good agreement between the HFFB and HFPI. The HFFB by the base moment analysis produced lower results than that of the generalized wind force analysis. On the other hand, the results from the HFPI by the base moment analysis and generalized wind force analysis are identical.

Keywords: high frequency force balance, pressure integration method, wind tunnel test, wind load analysis, wind-induced loads

1. คำนำ

แรงลมเป็นแรงกระทำทางด้านข้างที่มีความสำคัญมากแรงหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างอาคารสูงเพราะยิ่งอาคารมีความสูงมากเท่าใดผลของแรงลมที่กระทำย่อมมีมากเท่านั้น การละเลยผลของแรงลมหรือการวิเคราะห์ผลที่ไม่ถูกต้องและเพียงพอนำมาซึ่งความเสียหายของโครงสร้างได้ โดยในการวิเคราะห์ผลของแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงส่วนใหญ่นิยมใช้การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมเพราะสามารถจำลองสภาพแวดล้อมและสภาพลมที่สมจริง ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและแม่นยำสูงมาก วิธีการทดสอบที่นิยมใช้กันมาอย่างยาวนานและแพร่หลายคือวิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลอง ซึ่งเป็นการหาค่าแรงลมโดยรวมจากการวัดค่าแรงที่ฐานของแบบจำลองทั้ง 6 ทิศทาง ได้แก่ แรง 3 ทิศทาง และโมเมนต์ 3 ทิศทาง และต้องใช้สมมติฐานการกระจายแรง โดยที่ส่วนเฉลี่ย และส่วนกึ่งสถิต จะกระจายผลของแรงลมตามค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังความเร็วลมเฉลี่ย มีแค่ส่วนกำหนดที่กระจายตามรูปร่างการสั่นไหวของอาคารแต่ก็เป็นการสั่นไหวแคโหมดที่หนึ่งเท่านั้น จะเห็นได้ว่าไม่สามารถคิดผลของโหมดสูง ๆ จากวิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลองได้ เพราะแรงลมที่กระทำตามความสูงมาจากการใช้สมมติฐาน ซึ่งไม่ใช่แรงลมที่กระทำตามความสูงที่แท้จริง

วิธีการวิเคราะห์แรงลมโดยรวมโดยใช้การรวมผลจากการวัดความดัน เป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาผลของแรงลมโดยรวมที่กระทำกับ อาคารได้ไม่แพ้วิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลอง โดยเป็นการทดสอบ ด้วยการวัดความดันผ่านท่อวัดความดันบนแบบจำลองอะคริลิกแข็ง แรงลม โดยรวมที่กระทำกับอาคารจะได้จากการรวมผลของความดันที่วัดได้จากท่อ วัดความดันที่ติดตั้งไว้ทั่วทั้งอาคารโดยเรียกรวมวิธีนี้ว่าวิธีการรวบรวมผลของ แรงดัน (Pressure Integration Method) หรืออาจเรียกชื่อเต็มได้อีกหนึ่ง ชื่อว่า High Frequency Pressure Integration (HFPI) วิธีการรวบรวมผล ของแรงดันจะทำให้การกระจายตัวของแรงตลอดความสูงของอาคารได้ดีและ สมจริงกว่าวิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลอง และเนื่องด้วยวิธีการ รวบรวมผลของแรงดันนั้นให้การกระจายตัวของแรงตามความสูงของอาคาร ที่สมจริง จึงทำให้สามารถคิดผลของโหมคสูง ๆ ในแต่ละทิศทางได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ข้อมูลแรงดันที่ได้จากการทดสอบไปออกแบบส่วน ผังรอบอาคารได้อีกด้วย

วิธีในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจากทั้งสองวิธีมักจะใช้ การวิเคราะห์จากผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง Zhou, et.al. 2003 [1], Kwon, et.al. 2008 [2] และบุญญภิญโญ [7] ส่วนการ วิเคราะห์ผลลัพท์วิธีจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ค่าแรงลมเชิงโหมค (Generalized Wind Force) Chen และ Kareem 2005 [3] ซึ่งข้อดีของ วิธีนี้คือสามารถวิเคราะห์แรงลมในโหมคการสั้นไหวสูง ๆ ได้ Huang และ Chen 2007 [4] โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาถึงความแตกต่าง ระหว่างการทดสอบทั้งสองวิธีจากการวิเคราะห์ผลด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ ฐานของแบบจำลองและการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมค

2. การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

2.1 การทดสอบในอุโมงค์ลม

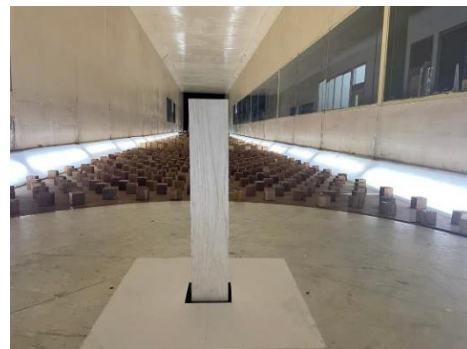
การศึกษาเป็นการทำการทดสอบแบบจำลอง ณ ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ ลม ธรรมศาสตร์-เอไอที (TU-AIT Wind Tunnel Laboratory) ณ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต โดยมีความยาวช่วง ทดสอบ 25.5 เมตร ขนาดหน้าตัดของอุโมงค์ กว้าง 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ความเร็วลมอ้างอิงสำหรับอาคารจริงเท่ากับ 25 เมตรต่อ วินาที โดยแบบจำลองได้ทำการย่อขนาดด้วยมาตราส่วน 1/400 และทำ การทดสอบตั้งแต่มุม 0 ถึง 360 องศา โดยเพิ่มทีละ 10 องศา ในสภาพภูมิ ประเทศแบบเมืองใหญ่ โดยตำแหน่งและทิศทางการปะทะของลมกับ แบบจำลองแสดงในรูปที่ 4

การทดสอบแบบจำลองด้วยวิธีวัดแรงลัพท์ที่ฐานของแบบจำลอง จะทำ การสร้างแบบจำลองด้วยไม้บัลซ่าและมีความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองสูง มากดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วทำการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องวัดแรงที่ฐาน JR3 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดแรงและโมเมนต์ที่มีความละเอียดสูง โดยทำการวัดเก็บ ค่าแรงที่ฐานทั้ง 3 ทิศทาง (P_x, P_y, P_z) และโมเมนต์ที่ฐานทั้ง 3 ทิศทาง (M_x, M_y, M_z) ด้วยอัตราการเก็บข้อมูลเท่ากับ 1,000 ข้อมูลต่อวินาที และใช้เวลาในการเก็บข้อมูล 3.5 นาที ต่อการวัดหนึ่งรอบมุม โดยม ีความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดแบบจำลองเท่ากับ 8.87 เมตรต่อวินาที

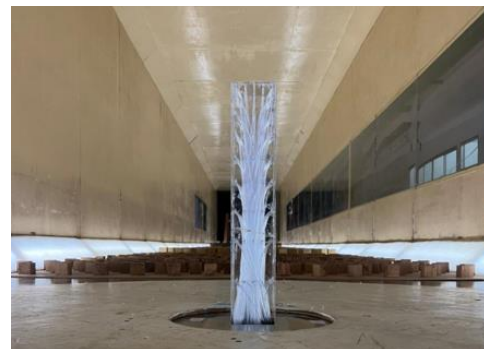
ส่วนวิธีการรวบรวมผลของแรงดัน จะทำการสร้างแบบจำลองด้วย อะคริลิกแข็งดังแสดงในรูปที่ 3 และทำการเก็บข้อมูลของแรงดันพร้อมกัน ผ่านท่อวัดความดันที่ติดตั้งอยู่บริเวณทั่วทั้งแบบจำลองจำนวน 180 จุด ด้วยอัตราการเก็บข้อมูลเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที และใช้เวลาในการเก็บ ข้อมูล 2 นาที ต่อการวัดหนึ่งรอบมุม โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอด แบบจำลองเท่ากับ 8.94 เมตรต่อวินาที



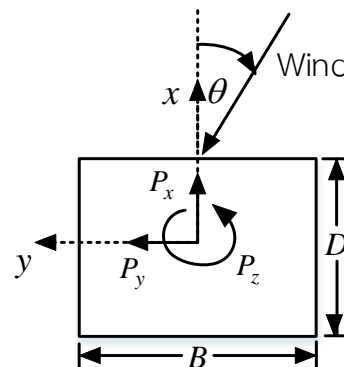
รูปที่ 1 อุโมงค์ลม ธรรมศาสตร์-เอไอที



รูปที่ 2 แบบจำลองอาคารที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธี HFFB



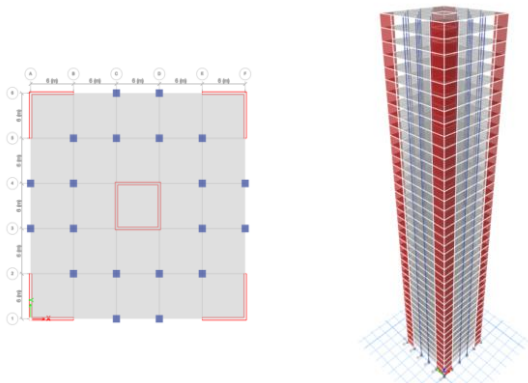
รูปที่ 3 แบบจำลองอาคารที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธี HFPI



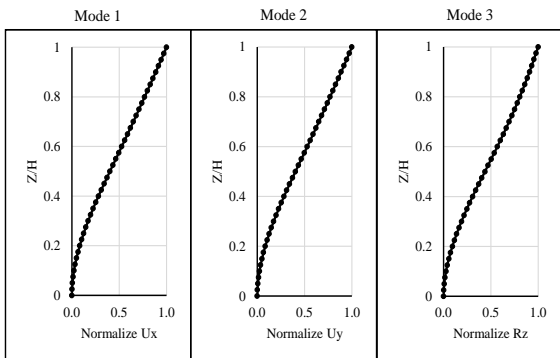
รูปที่ 4 ทิศทางและตำแหน่งการปะทะของลมกับแบบจำลอง

2.2 คุณสมบัติของอาคารที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างอาคารที่ใช้ในการศึกษามีขนาด กว้าง 30 ม. ยาว 30 ม. และสูง 160 ม. โดยแบบจำลองโครงสร้างได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีจำนวนชั้นทั้งหมด 40 ชั้น ความสูงระหว่างชั้นเท่ากับ 4 ม. ความหนาแน่นของอาคารเท่ากับ 382 กก./ลบ.ม. ความถี่ธรรมชาติ 3 โหมดแรกของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 6 โดยความถี่โหมดที่ 1 เป็นความถี่ในทิศทาง x เท่ากับ 0.169 Hz ความถี่โหมดที่ 2 เป็นความถี่ในทิศทาง y เท่ากับ 0.169 Hz และความถี่โหมดที่ 3 เป็นความถี่ในทิศทาง z เท่ากับ 0.303 Hz



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างอาคารสูงในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์



$f_1 = 0.169$ Hz $f_2 = 0.169$ Hz $f_3 = 0.303$ Hz

รูปที่ 6 รูปร่างการสั่นไหว 3 โหมดแรกของอาคารที่ศึกษา

3. การวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง

การวิเคราะห์นี้เป็นการใช้ค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาแรงลมโดยรวมที่กระทำกับอาคารสูง สำหรับวิธี HFFB จะได้ค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานจากการทดสอบมาใช้ได้เลย ส่วนวิธี HFPI จะต้องทำการแปลงค่าความดันมาเป็นค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองก่อน

3.1 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย

เป็นการหารปรับแก้ค่าในส่วนของคุณค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานส่วนเฉลี่ย (Mean) ให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงลมไร้หน่วย เพื่อใช้ในการพิจารณาถึงผล

ของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานส่วนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงในแต่ละองศาการปะทะ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_x = \frac{\bar{M}_{ym}(2 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} B_m H_m^2} \quad (1)$$

$$C_y = \frac{\bar{M}_{xm}(2 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} D_m H_m^2} (-1) \quad (2)$$

$$C_z = \frac{\bar{M}_{zm}(1 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} B_m D_m H_m} \quad (3)$$

โดยที่ C_x , C_y และ C_z คือค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของหน่วยแรงลม ในทิศทางตามลม ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางบิด \bar{M}_{xm} , \bar{M}_{ym} และ \bar{M}_{zm} คือค่าเฉลี่ยของโมเมนต์รวมที่ฐานของแบบจำลองรอบแกน x , y และ z α_m คือเลขยกกำลังความเร็วลมเฉลี่ยให้แปรเปลี่ยนตามความสูงตามสภาพภูมิประเทศที่จำลองในอูโมงค์ลม ρ_m คือความหนาแน่นของอากาศ \bar{U}_{Hm} คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดของแบบจำลอง H_m , B_m และ D_m คือ ความสูง ความกว้าง และความลึกแบบจำลอง q_{Hm} คือหน่วยแรงลมจากความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดของแบบจำลอง โดยสามารถคำนวณได้จาก $0.5\rho_m\bar{U}_{Hm}^2$

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำ

เป็นการหารปรับแก้ค่าของโมเมนต์ที่ฐานของแบบจำลองส่วนกึ่งสถิติ (Background) ซึ่งผลของโมเมนต์ในส่วนนี้จะเป็นส่วนแปรปรวนจากการสั่นไหวของแรงลมที่กระทำกับอาคารสูงแต่เป็นการสั่นด้วยความถี่ที่ต่ำมาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_{cmx} = \frac{\sigma_{mx}}{\frac{1}{2}\rho_m\bar{U}_{Hm}^2 D_m H_m^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{cmy} = \frac{\sigma_{my}}{\frac{1}{2}\rho_m\bar{U}_{Hm}^2 B_m H_m^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{cmz} = \frac{\sigma_{mz}}{\frac{1}{2}\rho_m\bar{U}_{Hm}^2 B_m D_m H_m} \quad (6)$$

โดยที่ σ_{cmx} , σ_{cmy} และ σ_{cmz} คือค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำรอบแกน x , y และ z σ_{mx} , σ_{my} และ σ_{mz} คือค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองรอบแกน x , y และ z

3.3 ค่าสเปกตรัมของโมเมนต์พลิกคว่ำที่แปรปรวนของแรงลม

เป็นการแปลงค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองที่เป็นข้อมูล อนุเวลาใด ๆ ให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ โดยค่าสเปกตรัมของโมเมนต์พลิกคว่ำจะแสดงถึงพลังงานเนื่องจากโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงลมส่วนแปรปรวนในความถี่ต่าง ๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_m(f_x) = \frac{f_x \times S_m(f_x)}{\sigma_{mx}^2} \quad (7)$$

$$C_m(f_y) = \frac{f_y \times S_m(f_y)}{\sigma_{my}^2} \quad (8)$$

$$C_m(f_z) = \frac{f_z \times S_m(f_z)}{\sigma_{mz}^2} \quad (9)$$

โดยที่ $C_m(f_x)$, $C_m(f_y)$ และ $C_m(f_z)$ คือค่าสเปกตรัมโมเมนต์พลิกคว่ำที่แปรปรวนของแรงลมรอบแกน x , y และ z

4. การวิเคราะห์หัดด้วยแรงลมเชิงโหมด

การวิเคราะห์หัดจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้แรงลมที่กระทำในแต่ละชั้นตามความสูงของแบบจำลอง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถคำนวณผลของโหมดการสั่นไหวสูง ๆ ของอาคารได้ สำหรับวิธี HFFB จะต้องทำการกระจายผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานให้เป็นแรงลมที่กระทำในแต่ละชั้นตามความสูงจากสมมติฐานค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังแรงลมเฉลี่ยก่อน ส่วนวิธี HFPI จะให้ค่าแรงลมที่กระทำในแต่ละชั้นตามความสูงจากการแปลงค่าความดันรอบๆอาคารแบบจำลอง

4.1 การแปลงค่าแรงจากการทดสอบ

แรงและโมเมนต์ที่วัดได้จากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมสามารถแปลงเป็นค่าแรงและโมเมนต์ของอาคารจริงได้จากความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$M_s(t) = M_m(t_m) / (\lambda_p \lambda_L^3 \lambda_U^2) \quad (10)$$

โดยที่ $M_s(t)$ คือค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารจริง $M_m(t_m)$ คือค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง $\lambda_p = \rho_m / \rho_p$ คือมาตราส่วนความหนาแน่นของอากาศ $\lambda_L = B_m / B_p$ คือมาตราส่วนความยาว $\lambda_U = U_m / U_p$ คือมาตราส่วนความเร็ว ตัวห้อย m, p หมายถึงแบบจำลองกับอาคารจริง

4.2 แรงลมเชิงโหมดส่วนเฉลี่ย

วิธี HFFB จะทำการกระจายค่าของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานส่วนเฉลี่ยให้เป็นแรงลมที่กระทำตามความสูงของอาคารตามสมการที่ 12-14 ส่วนวิธี HFPI สามารถคำนวณส่วนเฉลี่ยของแรงลมที่กระทำตามความสูงของอาคารได้โดยไม่ต้องใช้สมมติฐานในการกระจายแรง

$$\bar{Q}_j = \sum_{i=1}^N (\phi_{ijx} \bar{P}_{ix} + \phi_{ijy} \bar{P}_{iy} + \phi_{ijz} \bar{P}_{iz}) \quad (11)$$

$$\bar{P}_{ix} = \bar{M}_y \frac{2+2\alpha_p}{H^2} \left(\frac{z}{H}\right)^{2\alpha_p} \Delta H \quad (12)$$

$$\bar{P}_{iy} = \bar{M}_x \frac{2+2\alpha_p}{H^2} \left(\frac{z}{H}\right)^{2\alpha_p} \Delta H \quad (13)$$

$$\bar{P}_{iz} = \bar{M}_z \frac{1+2\alpha_p}{H} \left(\frac{z}{H}\right)^{2\alpha_p} \Delta H \quad (14)$$

โดยที่ \bar{Q}_j คือแรงลมเชิงโหมดส่วนเฉลี่ยของโหมดที่ j \bar{P}_{ix} , \bar{P}_{iy} และ \bar{P}_{iz} คือแรงลมเฉลี่ยที่กระทำกับอาคารจริงของชั้นที่ i ในทิศทาง x , y และ z \bar{M}_x , \bar{M}_y และ \bar{M}_z คือโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานส่วนเฉลี่ยของอาคารจริงรอบแกน x , y และ z ϕ_{ijx} , ϕ_{ijy} และ ϕ_{ijz} คือรูปร่างการสั่นไหวของอาคารชั้นที่ i โหมดที่ j ทิศทาง x , y และ z H คือความสูงของอาคาร z คือความสูงของชั้นที่พิจารณา ΔH คือความสูงระหว่างชั้นที่พิจารณา

4.3 แรงลมเชิงโหมดส่วนพลศาสตร์

การคำนวณค่าแรงลมเชิงโหมดส่วนพลศาสตร์สำหรับวิธี HFFB จะทำการกระจายค่าโมเมนต์ที่ฐานของอาคารส่วนพลศาสตร์ให้เป็นแรงลมที่กระทำตามความสูงของอาคารตามสมการที่ 16-18 ส่วนวิธี HFPI สามารถคำนวณส่วนพลศาสตร์ของแรงลมที่กระทำตามความสูงของอาคารได้เลย

$$Q_j(t) = \sum_{i=1}^N (\phi_{ijx} P_{ix}(t) + \phi_{ijy} P_{iy}(t) + \phi_{ijz} P_{iz}(t)) \quad (15)$$

$$P_{ix}(t) = M'_y(t) \frac{2+2\alpha_p}{H^2} \left(\frac{z}{H}\right)^{2\alpha_p} \Delta H \quad (16)$$

$$P_{iy}(t) = M'_x(t) \frac{2+2\alpha_p}{H^2} \left(\frac{z}{H}\right)^{2\alpha_p} \Delta H \quad (17)$$

$$P_{iz}(t) = M'_z(t) \frac{1+2\alpha_p}{H} \left(\frac{z}{H}\right)^{2\alpha_p} \Delta H \quad (18)$$

โดยที่ $Q_j(t)$ คือแรงลมเชิงโหมดส่วนพลศาสตร์ของโหมดที่ j $P_{ix}(t)$, $P_{iy}(t)$ และ $P_{iz}(t)$ คือแรงลมส่วนพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารจริงของชั้นที่ i ในทิศทาง x , y และ z $M'_x(t)$, $M'_y(t)$ และ $M'_z(t)$ คือโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานส่วนพลศาสตร์ของอาคารจริงรอบแกน x , y และ z

4.4 การเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงโหมด

การคำนวณผลของแรงลมโดยรวมด้วยแรงลมเชิงโหมดจะเป็นการคำนวณผลตามหลักพลศาสตร์โครงสร้าง โดยเป็นการใช้แรงลมที่กระทำตามความสูงของอาคารเพื่อคำนวณผลของการเคลื่อนที่ตอบสนองของแต่ละโหมด ที่เรียกว่า การเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงโหมด จากความสัมพันธ์ของสมการดังต่อไปนี้ ซึ่งเสนอโดย Chen และ Kareem [3]

$$\bar{q}_j = \frac{\bar{Q}_j}{K_j} \quad (19)$$

$$\sigma_{q_{jb}}^2 = \frac{1}{K_j^2} \int_0^\infty S_{Q_{ij}}(f) df \quad (20)$$

$$\sigma_{q_{jr}}^2 = \frac{1}{K_j^2} \frac{\pi}{4\xi_j} f_j S_{Q_{ij}}(f_j) \quad (21)$$

$$K_j = (2\pi f_j)^2 \sum_{k=1}^N (m_i \phi_{ijx}^2 + m_i \phi_{ijy}^2 + I_i \phi_{ijz}^2) \quad (22)$$

$$\sigma_{q_j} = \sqrt{\sigma_{q_{jb}}^2 + \sigma_{q_{jr}}^2} \quad (23)$$

โดย \bar{q}_j , $\sigma_{q_{jb}}^2$, $\sigma_{q_{jr}}^2$ และ σ_{q_j} คือการเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงโหนดส่วนเฉลี่ย ส่วนกึ่งสถิติ ส่วนกำหนดและส่วนพลศาสตร์ของโหนดที่ j K_j , f_j และ ξ_j คือสถิติเฟสเชิงโหนด ความถี่เชิงโหนด และความหน่วงเชิงโหนดของโหนดที่ j m_i คือมวลของชั้นที่ i I_i คือโมเมนต์ความเฉื่อยของชั้นที่ i $S_{Q_{ij}}$ คือ Power Spectrum Density ของ $Q_j(t)$

4.5 แรงลมสถิตเทียบเท่า

การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าสามารถคำนวณได้จากผลของการเคลื่อนที่เชิงโหนด

4.5.1 แรงลมสถิตเทียบเท่าส่วนเฉลี่ย

$$\bar{F}_{ijs} = (2\pi f_j)^2 m_{is} \phi_{ijs} \bar{q}_j \quad (s = x, y, z) \quad (24)$$

โดยที่ \bar{F}_{ijs} คือแรงลมสถิตเทียบเท่าเฉลี่ยที่กระทำตามความสูงของอาคารชั้นที่ i โหนดที่ j ในทิศทาง $s = x, y, z$

4.5.2 แรงลมสถิตเทียบเท่าส่วนพลศาสตร์

$$F_{ijs} = (2\pi f_j)^2 m_{is} \phi_{ijs} g \sigma_{q_{jb}} \quad (s = x, y, z) \quad (25)$$

$$g = \sqrt{2 \ln(fT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(fT)}} \quad (26)$$

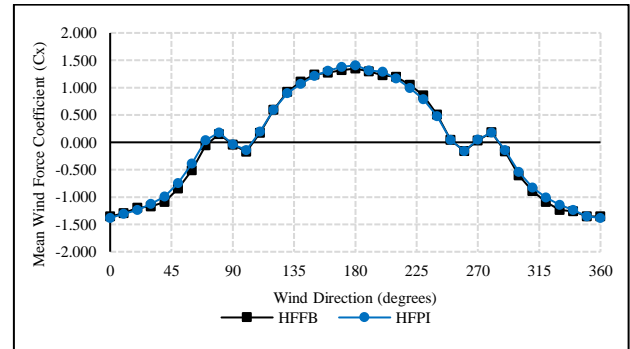
โดยที่ F_{ijs} คือแรงลมสถิตเทียบเท่าส่วนพลศาสตร์ที่กระทำตามความสูงของอาคารชั้นที่ i โหนดที่ j ในทิศทาง $s = x, y, z$ g คือค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองให้เป็นค่าสูงสุด

5. ผลการศึกษา

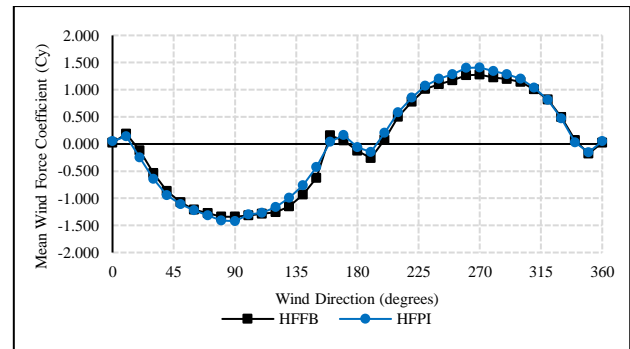
5.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง HFFB กับ HFPI ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง

จากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองระหว่างวิธี HFFB กับวิธี HFPI มีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำ ค่าสเปกตรัมของโมเมนต์พลิกคว่ำที่แปรปรวนของแรงลม ค่าโมเมนต์

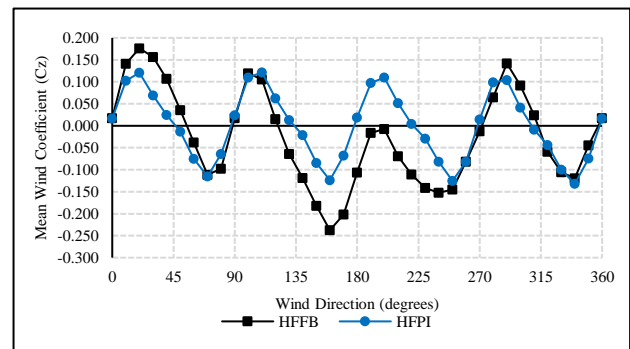
พลิกคว่ำและแรงลมสถิตเทียบเท่า แต่จากรูปที่ 9, 12 และ 15 จะเห็นว่า มีผลในทิศทางบิดหรือทิศทาง Z ที่มีผลไม่ราบรื่นเหมือนกับทิศทาง X และ Y เนื่องจากความไม่สมบูรณ์แบบ 100 เปอร์เซ็นต์ของแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งสำหรับวิธี HFFB การที่โมเดลมีการไม่สมบูรณ์แบบ 100 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ผลของทิศทางบิดที่ได้มีค่าที่ไม่สม่ำเสมอหรือโดดไปมา เนื่องจากผลรวมของแรงลมที่กระทำทั่วทั้งอาคารถูกวัดได้จากฐานของแบบจำลอง ซึ่งต่างจากวิธี HFPI ที่วัดค่าที่จุดต่าง ๆ รอบอาคารทำให้แม้ว่าแบบจำลองอาคารจะไม่สมบูรณ์แต่ก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อผลโดยรวมของอาคารมากนัก แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าผลในทิศทางบิดหรือทิศทาง Z จะต่างกัน ในบางองศาการปะทะ แต่ผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y



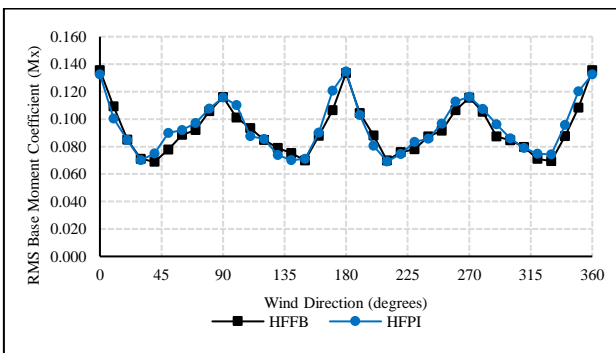
รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x



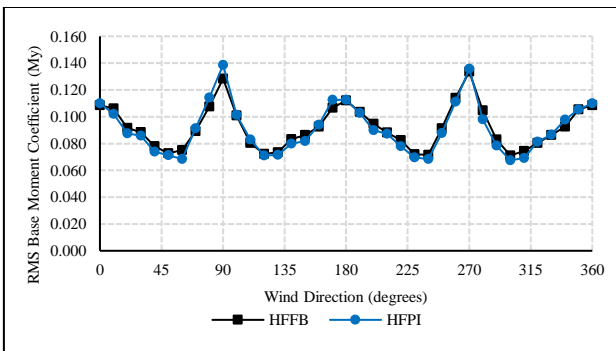
รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยสำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน z

รูปที่ 7-9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยที่ทิศทางลมกระทำทั้ง 360 องศา จะเห็นได้ว่าค่า C_x มีค่าสูงที่มุม 0 และ 180 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ M_y เป็นโมเมนต์ในทิศทางตามลม (Along-wind) ส่วนค่า C_y มีค่าสูงที่

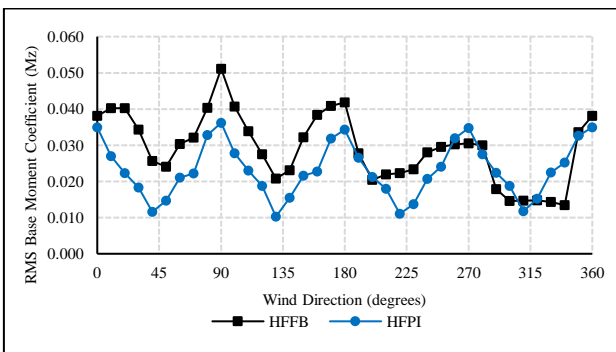
มุม 90 และ 270 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ M_x เป็นโมเมนต์ในทิศทางตามลม ซึ่งทั้ง HFFB และ HFPI ให้ผลที่สอดคล้องกับความหมายทางกายภาพสำหรับการตอบสนองของอาคารภายใต้แรงลมกระทำ ตามงานวิจัยที่ผ่านมา [1], [2] และ [5] โดยในทิศทางตามลมผลของแรงลมส่วนใหญ่เป็นแรงลมที่เข้าปะทะกับอาคาร ซึ่งจะมีค่าค่อนข้างราบรื่นและมีความผันผวนที่ต่ำ และจากรูปที่ 9 จะเห็นว่าค่า C_z สำหรับวิธี HFPI จะให้ค่าที่ราบรื่นกว่าวิธี HFFB เนื่องจากผลของความไม่สมบูรณ์แบบ 100 เปอร์เซ็นต์ของแบบจำลอง (Imperfection) โดยจะเห็นว่าค่า C_z สำหรับ HFPI มีค่าเป็นศูนย์ที่ทุก ๆ มุม 45 องศา ซึ่งสอดคล้องกับความหมายทางกายภาพ ส่วน HFFB จะมีเฉพาะช่วงมุม 130 - 210 ที่ให้ค่าที่ไม่สม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามค่า C_z สำหรับทั้งสองวิธีก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x



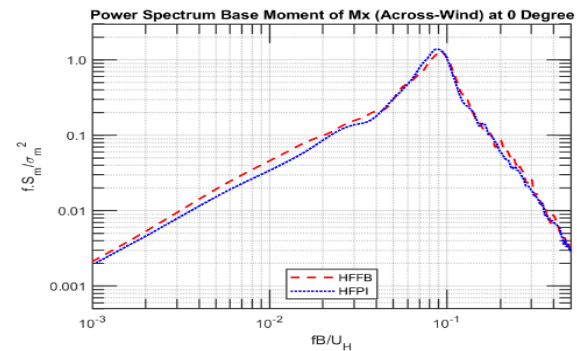
รูปที่ 11 สัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y



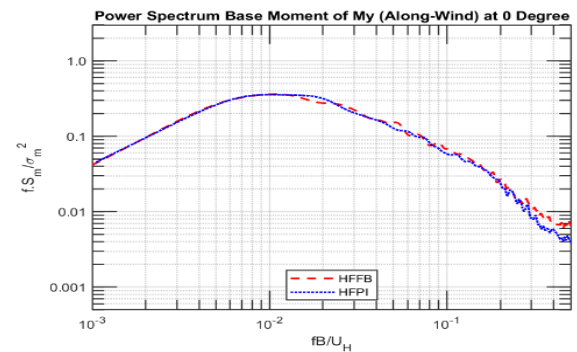
รูปที่ 12 สัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน z

จากรูปที่ 10 และ 11 จะเห็นได้ว่า RMS ของ M_x จะมีค่าสูงมากที่มุม 0 และ 180 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ M_x เป็นโมเมนต์ในทิศทางตั้งฉากกับ

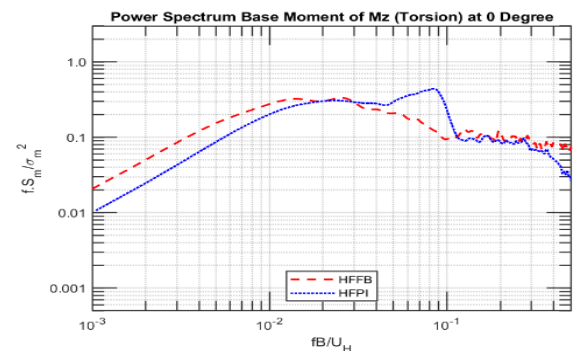
ทิศทางลม (Across-wind) ส่วน RMS ของ M_y จะมีค่าสูงที่มุม 90 และ 270 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ M_y เป็นโมเมนต์ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ซึ่งทั้ง HFFB และ HFPI ให้ผลที่สอดคล้องกับความหมายทางกายภาพ โดยในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมผลของแรงลมที่เข้ามากระทำกับอาคารจะเป็นผลของระลอกลม (Vortex shedding) ซึ่งจะมีความผันผวนมาก จึงส่งผลให้ค่า RMS ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมมีค่าสูง ส่วนในรูปที่ 12 จะเห็นว่าค่า RMS ที่ได้จากรวิธี HFPI มีค่าที่สม่ำเสมอและราบรื่นกว่าวิธี HFFB เนื่องจากความไม่สมบูรณ์แบบ 100 เปอร์เซ็นต์ของแบบจำลอง แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงที่เหมือนกัน



รูปที่ 13 Power spectrum density ของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x



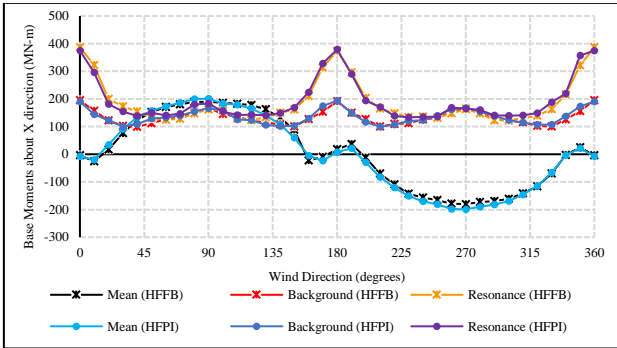
รูปที่ 14 Power spectrum density ของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y



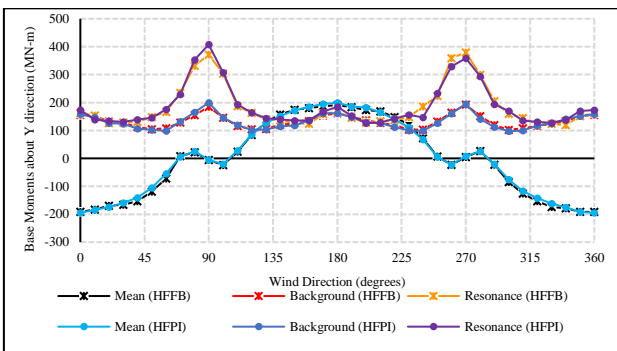
รูปที่ 15 Power spectrum density ของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน z

สำหรับค่า Power spectrum density (PSD) ของ M_x , M_y และ M_z ที่มุม 0 องศา แสดงดังรูปที่ 13-15 จะเห็นว่า PSD ของ M_x (Across-wind) สำหรับวิธี HFFB และ HFPI มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่มีค่า

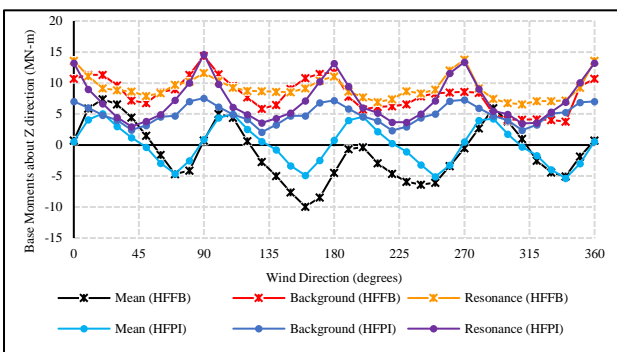
เด่นที่ความถี่ $f_B / U_H \approx 0.1$ (Strouhal frequency number) ส่วน M_y (Along-wind) สำหรับ HFFB และ HFPI มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และส่วน M_z สำหรับ HFFB และ HFPI มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ HFFB จะมีค่าที่สูงกว่าในบางความถี่ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรแบบ 100 เปอร์เซ็นต์ของแบบจำลอง แต่ค่าที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1], [2] และ [5]



รูปที่ 16 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x ของอาคารจริง



รูปที่ 17 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y ของอาคารจริง

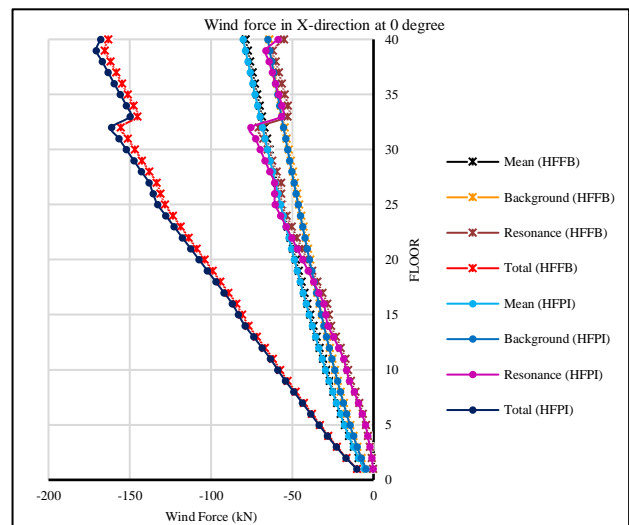


รูปที่ 18 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน z ของอาคารจริง

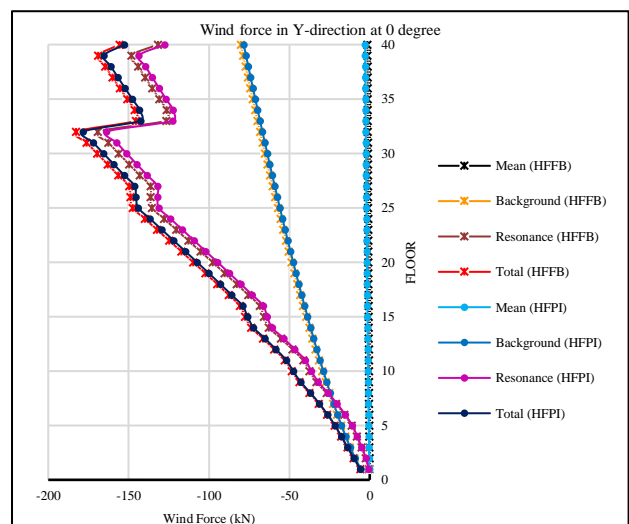
จากรูปที่ 16-18 แสดงค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x, y และ z ของอาคารจริงที่ทิศทางลมกระทำทั้ง 360 องศา ซึ่งโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารจริงให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมหน่วยที่ได้ อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ และจะเห็นได้ว่าวิธี HFFB และ HFPI ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันทั้งในส่วนเฉลี่ย (Mean) ส่วนกึ่งสถิติ (Background) และส่วนกำหนด (Resonance) ซึ่งจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x ของอาคารจริงในส่วนเฉลี่ย ส่วนกึ่งสถิติ ส่วนกำหนด และ

ผลรวมมีค่าต่างกันเท่ากับ 8%, 2%, 5% และ 3% ตามลำดับ สำหรับ โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y ของอาคารจริงในส่วนเฉลี่ย ส่วนกึ่งสถิติ ส่วนกำหนด และผลรวมมีค่าต่างกันเท่ากับ 2%, 1%, 2% และ 1% ตามลำดับ และโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน z ของอาคารจริง จะมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมีนัยสำคัญจากผลของการไม่สมมาตรแบบ 100 เปอร์เซ็นต์ของแบบจำลอง โดยในส่วนเฉลี่ย ส่วนกึ่งสถิติ ส่วนกำหนด และผลรวมมีค่าต่างกันเท่ากับ 37%, 17%, 33% และ 26% ตามลำดับ

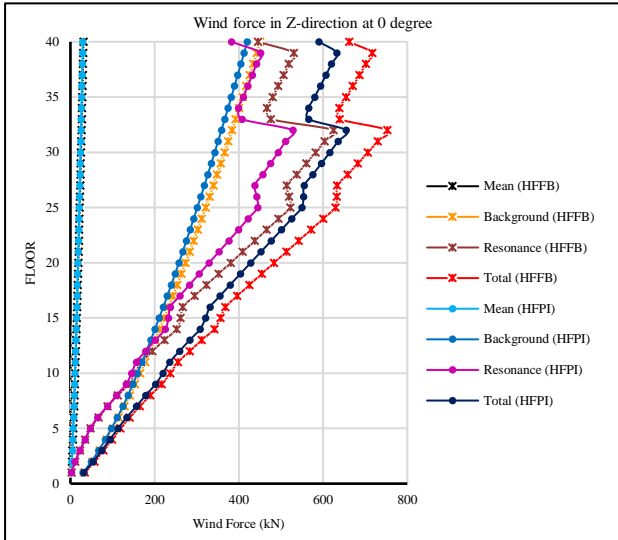
รูปที่ 19-21 แสดงผลของแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำในแต่ละชั้นตาม ความสูงของอาคารจริงในทิศทาง x, y และ z ที่มุม 0 องศา สำหรับการ วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองแรงลมสถิตเทียบเท่าจะ ได้จากการกระจายผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารจริง โดยส่วน เฉลี่ย กับส่วนกึ่งสถิติจะกระจายตามสมมติฐานค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลัง ความเร็วลมเฉลี่ย และส่วนกำหนดจะกระจายตามมวลและรูปร่างการสั้น ไหวของอาคาร ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากวิธี HFFB และ HFPI มีค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 19 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทาง x ระหว่างวิธี HFFB กับ HFPI ที่ วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง



รูปที่ 20 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทาง y ระหว่างวิธี HFFB กับ HFPI ที่ วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง



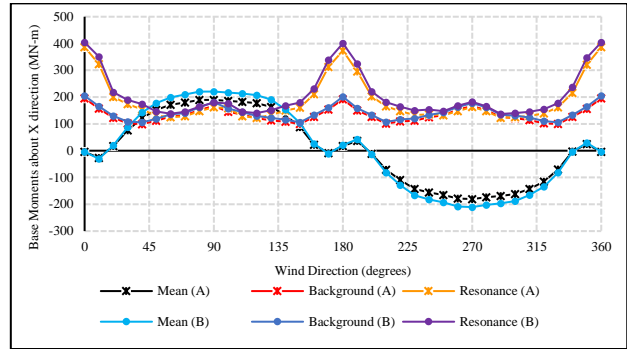
รูปที่ 21 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทาง z ระหว่างวิธี HFFB กับ HFPI ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยผลการเปรียบเทียบโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารจริงระหว่างวิธี HFFB กับ HFPI ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง

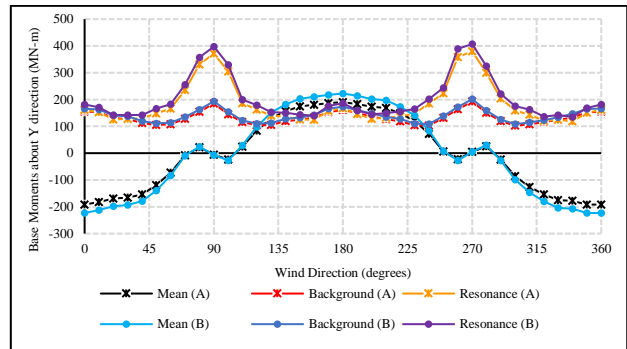
ค่าเฉลี่ย	HFPI/HFFB			
	Mean	Background	Resonance	Total
โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน X	1.08	1.02	1.05	1.03
โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน Y	0.98	0.99	1.02	0.99
โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน Z	1.37	0.83	0.67	0.74

5.2 ผลการเปรียบเทียบของ HFFB ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมเชิงโหมด

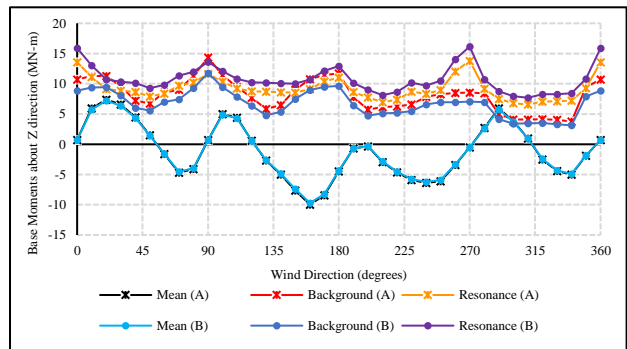
สำหรับค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารจริงของการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดจะคำนวณจากการรวมผลของแรงลมสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยแขนของโมเมนต์ โดยจากการศึกษาพบว่าวิธี HFFB ที่วิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดจะให้ผลลัพธ์ที่สูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 22 และ 23 โดยเฉพาะส่วนของค่าเฉลี่ยในทิศทาง x และ y ที่มีความแตกต่างกันถึง 17% รวมไปถึงส่วนก้ำทอนและผลรวมที่มีค่าต่างกันถึง 11% แต่สำหรับส่วนกึ่งสถิตจะมีค่าต่างกันเท่ากับ 6% สำหรับโมเมนต์ในทิศทาง x และ 7% สำหรับโมเมนต์ในทิศทาง y ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งก็เพราะว่าการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดของวิธี HFFB ต้องอาศัยการกระจายผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองให้เป็นแรงลมที่กระทำตามความสูงตามสมมติฐานด้วยค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังแรงลมเฉลี่ย ซึ่งเป็นเพียงการประมาณการกระจายตัวของแรงลมที่กระทำตามความสูงจึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าสูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองซึ่งเป็นการใช้ค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่วัดได้โดยตรงสำหรับวิธี HFFB (A) คือการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง และ (B) คือการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมด



รูปที่ 22 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x ของอาคารจริงด้วยวิธี HFFB



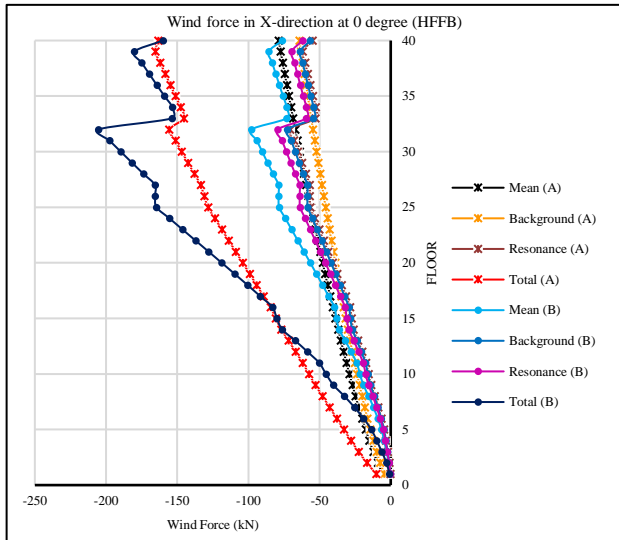
รูปที่ 23 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y ของอาคารจริงด้วยวิธี HFFB



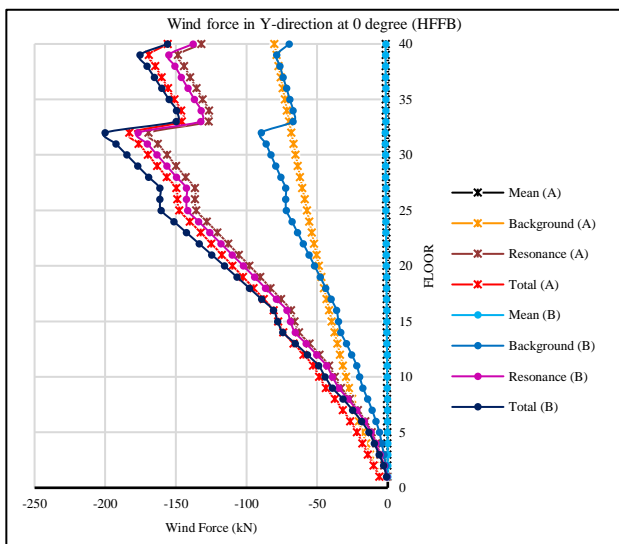
รูปที่ 24 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน z ของอาคารจริงด้วยวิธี HFFB

จากรูปที่ 24 จะเห็นว่าส่วนค่าเฉลี่ยของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารจริงในทิศทาง z มีค่าที่ใกล้เคียงกันระหว่างการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบ ทั้ง ๆ ที่ใช้สมมติฐานการกระจายผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐาน โดยจากตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ในทิศทาง z มีค่าต่างกันเพียง 3% เนื่องจากการกระจายตัวของโมเมนต์ในทิศทาง z มีการกระจายตัวที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันกับการกระจายตัวตามค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังความเร็วลมเฉลี่ย และการกระจายผลของโมเมนต์ในทิศทาง z เป็นการกระจายผลของโมเมนต์เป็นแรงบิดโดยตรง ทำให้มีความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าโมเมนต์ในทิศทาง x และ y ที่เป็นการกระจายค่าโมเมนต์ให้เป็นค่าแรง รวมไปถึงผลของโมเมนต์ในทิศทาง z สำหรับอาคารที่มีรูปทรงสมมาตรนั้นมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับโมเมนต์ในทิศทาง x และ y แต่สำหรับส่วนก้ำทอนของการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดจะให้ค่าสูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง 17% เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์ที่ฐาน

ของแบบจำลองมีการปรับแก้ผลของรูปร่างการสั่นไหว (Mode shape correction) เท่ากับ 0.7 ทำให้ค่าโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองมีค่าลดลง สำหรับส่วนกึ่งสถิติจะเห็นว่าการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดให้ค่าที่ต่ำกว่าการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองเท่ากับ 17% เนื่องจากผลของโมเมนต์ส่วนกึ่งสถิติสำหรับการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดมีการคิดผลของการปรับแก้รูปร่างการสั่นไหวของอาคารเข้าไปด้วยจึงทำให้ผลที่ได้มีค่าที่ลดลง



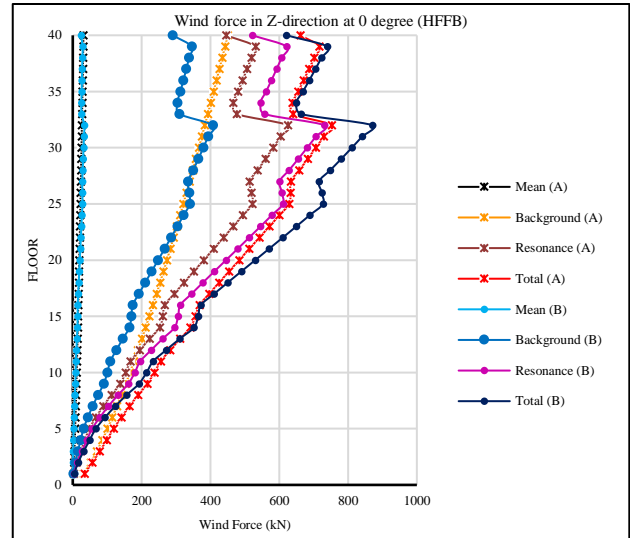
รูปที่ 25 แรงลมสถิติเทียบเท่าในทิศทาง x ของวิธี HFFB ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมเชิงโหมด



รูปที่ 26 แรงลมสถิติเทียบเท่าในทิศทาง y ของวิธี HFFB ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมเชิงโหมด

จากรูปที่ 25-27 แสดงแรงลมสถิติเทียบเท่าในทิศทาง x, y และ z ที่มุม 0 องศา สำหรับการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดจะให้ผลลัพธ์เป็นแรงลมสถิติเทียบเท่าที่กระทำในแต่ละชั้นตามความสูงของอาคารโดยตรง ส่วนการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองจะต้องทำการกระจายผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารก่อน ซึ่งจะเห็นว่าแรงลมสถิติเทียบ

ในทิศทาง x ซึ่งเป็นทิศทางตามลม ผลลัพธ์ส่วนมากเป็นผลของส่วนเฉลี่ย ส่วนแรงลมสถิติเทียบเท่าในทิศทาง y และ z ซึ่งเป็นทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและทิศทางบิด ผลลัพธ์ส่วนมากเป็นส่วนพลศาสตร์ ส่วนเฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งสอดคล้องตามความหมายทางกายภาพสำหรับการตอบสนองของอาคารภายใต้แรงลมกระทำ



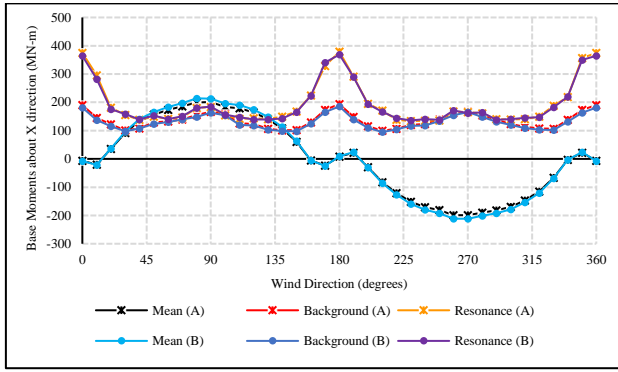
รูปที่ 27 แรงลมสถิติเทียบเท่าในทิศทาง z ของวิธี HFFB ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมเชิงโหมด

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยผลการเปรียบเทียบโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของอาคารจริงสำหรับวิธี HFFB ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง (A) กับแรงลมเชิงโหมด (B)

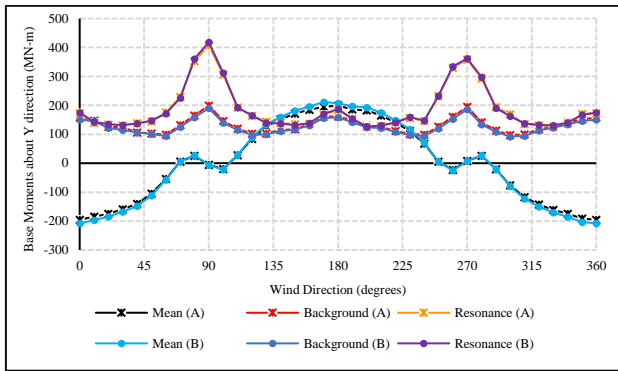
ค่าเฉลี่ย	(B)/(A)			
	Mean	Background	Resonance	Total
โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน X	1.17	1.06	1.11	1.11
โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน Y	1.17	1.07	1.11	1.11
โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน Z	0.97	0.83	1.17	1.02

5.3 ผลการเปรียบเทียบของ HFPI ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมเชิงโหมด

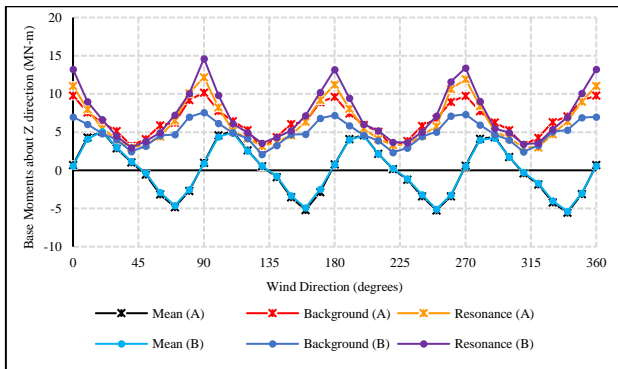
จากการศึกษาพบว่าสำหรับวิธี HFPI การวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 28-30 โดยที่ส่วนเฉลี่ยสำหรับโมเมนต์รอบแกน x และ y มีค่าต่างกัน 6% ส่วนกึ่งสถิติต่างกัน 4% ส่วนกำหนดมีค่าที่เท่ากัน และผลรวมของโมเมนต์ต่างกันเพียงแค่ 1% ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งทำให้เห็นว่าผลของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมที่กระทำตามความสูงของแบบจำลองมีความสอดคล้องกัน เนื่องจากแรงลมที่กระทำตามความสูงของแบบจำลองเป็นค่าที่แท้จริงจากรวมผลของความดันที่วัดได้ตลอดความสูงทั่วทั้งแบบจำลอง ((A) คือการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลอง และ (B) คือการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมด)



รูปที่ 28 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน x ของอาคารจริงด้วยวิธี HFPI

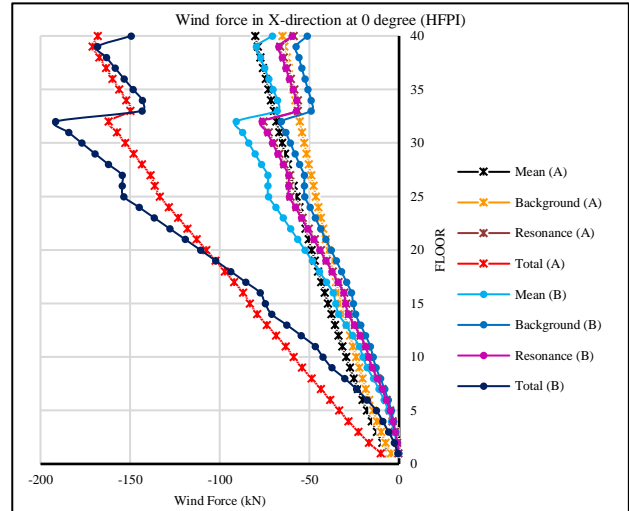


รูปที่ 29 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน y ของอาคารจริงด้วยวิธี HFPI

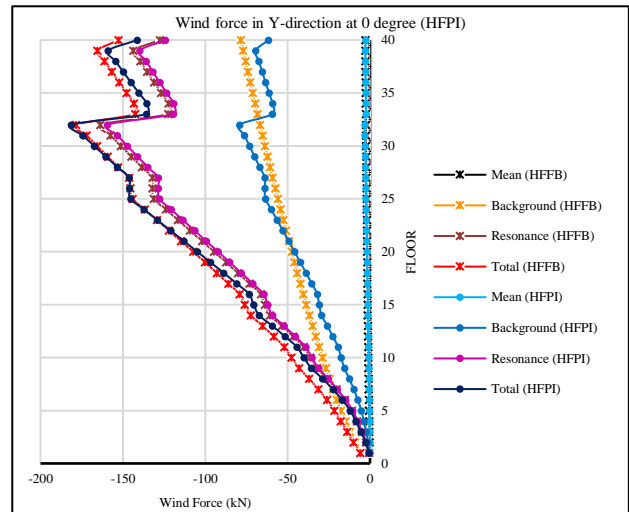


รูปที่ 30 โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน z ของอาคารจริงด้วยวิธี HFPI

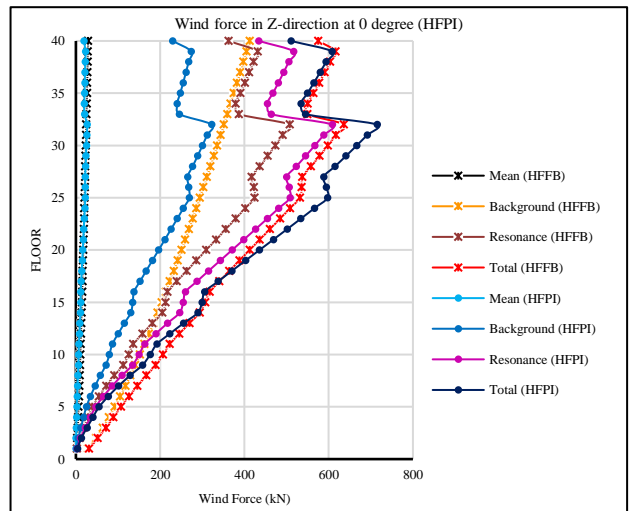
จากตารางที่ 3 และรูปที่ 30 จะเห็นว่าโมเมนต์ที่ฐานของอาคารจริงรอบแกน z ส่วนเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบ โดยมีค่าต่างกัน 5% ในส่วนที่สถิติการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดให้ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองเท่ากับ 24% เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดมีการปรับแก้ผลของรูปร่างสันไหวของอาคารทำให้ค่าที่ได้มีคาลดลง ส่วนกำหนดมีค่าต่างกันระหว่างการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบ เท่ากับ 13% เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองมีการใช้ตัวคูณปรับแก้รูปร่างการสันไหวของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานรอบแกน z เท่ากับ 0.7



รูปที่ 31 แรงลมสถิติเทียบเท่าในทิศทาง x ของวิธี HFPI ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมเชิงโหมด



รูปที่ 32 แรงลมสถิติเทียบเท่าในทิศทาง y ของวิธี HFPI ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมเชิงโหมด



รูปที่ 33 แรงลมสถิติเทียบเท่าในทิศทาง z ของวิธี HFPI ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของแบบจำลองกับแรงลมเชิงโหมด

จากรูปที่ 31-33 แสดงแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทาง x, y และ z ที่มีม 0 องศา โดยที่แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทาง x ซึ่งเป็นทิศทางตามลม ผลลัพธ์ส่วนใหญ่มาจากส่วนเฉลี่ย ส่วนแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทาง y และ z ซึ่งเป็นทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและทิศทางบิด ผลลัพธ์ส่วนใหญ่เป็นส่วน พลศาสตร์ ส่วนเฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งสอดคล้องตามความหมายทาง กายภาพสำหรับการตอบสนองของอาคารภายใต้แรงลมกระทำ

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยผลการเปรียบเทียบโมเมนต์พื้นฐานของอาคารจริงสำหรับวิธี HFPI ที่วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำพื้นฐานของแบบจำลอง (A) กับแรงลมเชิง โหมด (B)

ค่าเฉลี่ย	(B)/(A)			
	Mean	Background	Resonance	Total
โมเมนต์พลิกคว่ำพื้นฐานรอบ แกน X	1.06	0.96	1.00	1.01
โมเมนต์พลิกคว่ำพื้นฐานรอบ แกน Y	1.06	0.96	1.00	1.01
โมเมนต์พลิกคว่ำพื้นฐานรอบ แกน Z	0.95	0.76	1.13	0.96

6. บทสรุป

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมด้วยวิธี HFFB กับวิธี HFPI ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำพื้นฐานของ แบบจำลอง และจากผลการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำพื้นฐานของ แบบจำลองกับการวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมดสำหรับแต่ละวิธีแสดงให้เห็นว่า วิธี HFFB จะให้ผลการทดสอบที่แม่นยำและถูกต้องมากสำหรับการ วิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำพื้นฐานของแบบจำลอง แต่สำหรับวิธี HFPI จะให้ผลที่มีความแม่นยำทั้งการวิเคราะห์ด้วยโมเมนต์พลิกคว่ำพื้นฐานและ การวิเคราะห์ด้วยแรงลมเชิงโหมด เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธี HFPI จะให้ ค่าแรงลมที่กระทำตามความสูงที่ถูกต้องและสมจริง ส่วนวิธี HFFB ยังต้อง อาศัยสมมติฐานในการกระจายค่าโมเมนต์พื้นฐานของแบบจำลองให้เป็นค่า แรงลมที่กระทำตามความสูงอยู่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yin Zhou, Tracy Kijewski and Ahsan Kareem. (2003). Aerodynamic loads on tall buildings: interactive database. *Journal of Structure Engineering*, pp. 394-404.
- [2] Dae-Kun Kwon, Tracy Kijewski-Correa and Ahsan Kareem. (2008). E-analysis of high-rise buildings subjected to wind loads. *Journal of Structure Engineering*, pp. 1139-1153.
- [3] Xinzhoung Chen and Ahsan Kareem. (2005). Coupled dynamic analysis and equivalent static wind loads on buildings with three-dimensional modes. *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 1071-1082.
- [4] Guoqing Huang and Xinzhoung Chen. (2007). Wind load effects and equivalent static wind loads of tall buildings base on synchronous pressure measurements. *Engineering Structure*, pp. 2641-2653.
- [5] Andrew Steckley, Marco Accardo, Scott L. Gamble and Peter A. Irwin. (1992). The use of integrated pressure to determine overall wind-induced response. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 1023-1034.
- [6] Aly Mousaad Aly. (2013). Pressure integration technique for predicting wind-induced response in high-rise buildings. *Alexandria Engineering Journal*, pp. 717-731.
- [7] วิโรจน์ บุญญภิญโญ (2561). การออกแบบและพฤติกรรมโครงสร้าง เหล็ก รับแรงในแนวดิ่งและแรงด้านข้าง. บริษัท เอสพีเอ็ม การพิมพ์ จำกัด, หน้า 674-679.