

การคำนวณแรงลมของอาคารเตี้ยหลังคาทรงจั่วและโค้ง
โดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

WIND LOAD CALCULATION OF LOW-RISE BUILDINGS WITH GABLE
AND ARCHED ROOFS BY WIND TUNNEL TEST

นรวิชัย มั่นศิลป์¹ จิรวัดน์ จันทร์เรือง² และ วิโรจน์ บุญญะปิณู^{3*}

¹นักศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, เลขที่ 99 หมู่ 18 ถ. พหลโยธิน
ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, norawish.mans@dome.tu.ac.th

²อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย, 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330,
jirawat_ju@rmutto.ac.th

^{3*}อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, เลขที่ 99 หมู่ 18 ถ. พหลโยธิน
ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, bvrote@engr.tu.ac.th

Norawish Mansin¹, Jirawat Junruang² and Virote Boonyapinyo^{3*}

¹Graduate Student, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering,
Thammasat University, 99 Phahonyothin Rd, Khlong Nueng, Khlong Luang District,
PathumThani 12120, Thailand' norawish.mans@dome.tu.ac.th

²Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok, 10330,
Thailand, jirawat_ju@rmutto.ac.th

^{3*}Lecturer, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering,
Thammasat University, 99 Phahonyothin Rd, Khlong Nueng, Khlong Luang District,
PathumThani 12120, Thailand, bvrote@engr.tu.ac.th

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของแรงลมที่กระทำต่ออาคารเตี้ยหลังคาจั่วความชัน 18.4° และ 26.7° และหลังคาโค้งความชันเทียบเท่า 18° โดยทดสอบแบบจำลองสัดส่วน 1:80 ในอุโมงค์ลม เพื่อประเมินพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉพาะที่

2) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวทั้งหมดแต่ละด้าน และ 3) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยตามพื้นที่รับลมของโซนต่าง ๆ ในแต่ละด้านของแบบจำลอง ซึ่งประยุกต์ใช้แผนภูมิไวโรนอยในการคำนวณพื้นที่รับลมอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาพบพฤติกรรมแรงลมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างหลังคาจั่วและหลังคาโค้ง สำหรับหลังคาจั่ว ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวมีแนวโน้มสอดคล้องกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 และ ASCE 7-22 อย่างไรก็ตาม ในบริเวณวิกฤตของหลังคาจั่ว 18.4° พบว่ามาตรฐาน มยผ.1311-50 ให้ค่าหน่วยแรงลมออกแบบโครงสร้างรองต่ำกว่าผลการทดสอบ ขณะที่มาตรฐาน ASCE 7-22 ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลทดลองได้ดีกว่า นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังช่วยเสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมแรงลมบนหลังคาโค้ง ซึ่งยังไม่มีระบุในมาตรฐาน มยผ.1311-50

คำสำคัญ: แรงลม, อาคารเตี้ย, การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม, มาตรฐานการคำนวณแรงลม

ABSTRACT

This study investigates the wind pressure distribution on low-rise buildings with gable roofs at 18.4° and 26.7° pitches, and a curved roof with an equivalent pitch of 18° . Experimental tests were conducted using 1:80 scale models in a boundary layer wind tunnel to evaluate three aerodynamic characteristics: (1) local wind pressure coefficients, (2) surface-averaged wind pressure coefficients over each entire building face, and (3) area-averaged wind pressure coefficients corresponding to specific tributary zones on each face. A Voronoi approach was systematically employed to calculate the tributary areas. The findings reveal distinct differences in aerodynamic behavior between the gable and curved roof configurations. For gable roofs, the surface-averaged wind pressure coefficients generally align with the provisions of DPT 1311-50 and ASCE 7-22. However, within the critical zones of the 18.4° gable roof, the DPT 1311-50 standard underestimates the design wind pressures for components and cladding (C&C) compared to the experimental results, whereas the ASCE 7-22 standard yields better agreement with the empirical data. Furthermore, this study contributes to the fundamental understanding of wind-induced pressures on curved roofs, addressing a significant gap in the DPT 1311-50 standard where provisions for such geometries are currently lacking.

KEYWORDS: wind load, low-rise buildings, wind tunnel test, wind load standards

1. คำนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารเตี้ย เช่น อาคารหลังคาช่วงยาวและอาคารพักอาศัยทั่วไป มีรูปแบบทางสถาปัตยกรรมที่หลากหลายและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ระบบโครงสร้างได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ขณะเดียวกันเทคโนโลยีวัสดุสมัยใหม่ทำให้สามารถผลิตวัสดุที่มีกำลังสูงแต่น้ำหนักเบา ส่งผลให้อาคารมีความอ่อนตัว (flexibility) มากขึ้นเมื่อเทียบกับในอดีต ลักษณะดังกล่าวทำให้อาคารมีความไวต่อแรงกระทำจากลมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โครงสร้างหลังคาและวัสดุผนังมักเป็นส่วนแรกที่เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงเมื่อเผชิญกับพายุลมแรง Al-Chalabi และ Elshaer [1] พบว่าความเสียหายนี้มักเริ่มต้นจากการเกิดความดันลบ (Suction) เฉพาะจุดที่มีค่าสูงมากบริเวณขอบและมุมของหลังคา อันเป็นผลมาจากการแยกตัวของกระแสลม (Flow separation) และการก่อตัวของกระแสวน (Vortices) การทำความเข้าใจและประเมินแรงลมเหล่านี้อย่างแม่นยำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของโครงสร้าง

การป้องกันความเสียหายดังกล่าววิศวกรโครงสร้างจึงพึ่งพามาตรฐานการออกแบบแรงลมเป็นหลัก เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของมาตรฐานนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาแบบจำลองในอุโมงค์ลมเปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ho et al [2] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของหลังคาทรงจั่วที่ความชัน 1.19° , 14° และ 26.6° ภายใต้สภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่งและชานเมือง โดยพบว่ามาตรฐาน ASCE 7-02 [3] ให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบในระดับจุดวัดแรงดัน (local point load) ขณะที่ค่าแรงลมเฉลี่ยบนพื้นที่มีความสอดคล้องกันในภาพรวม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Tamura [4] ที่ทำการทดสอบหลังคาแบน หลังคาจั่ว และหลังคาปั้นหยา โดยวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงลมในแต่ละพื้นที่ผิว ซึ่งเป็นแนวทางพื้นฐานของการศึกษารังนี้ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบพบว่าทิศทางลมที่ตั้งฉากกับสันหลังคาให้ค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Tamura [4] เนื่องจากความแตกต่างของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของอาคาร โดยงานวิจัยนี้มีอัตราส่วน 5:8 (W:L) ขณะที่งานวิจัยของ Tamura [4] มีค่า 2:5 (W:L) ส่งผลให้พื้นที่รับลมและพฤติกรรมการไหลของลมแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม มาตรฐานส่วนใหญ่มักทำการลดทอนความซับซ้อนของพฤติกรรมอากาศพลศาสตร์ให้อยู่ในรูปของช่วงความชันหลังคาแบบไม่ต่อเนื่อง ในด้านมาตรฐานการออกแบบมาตรฐาน ASCE 7-22 [5] และ ASCE 7-16 [6] มีการแบ่งพื้นที่รับลมเฉพาะที่สำหรับการออกแบบโครงสร้างรองรับบริเวณมุมและขอบอย่างละเอียด รวมถึงการแบ่งช่วงความชันของหลังคาเป็นสี่ช่วง ได้แก่ $\theta < 7^\circ$, $7^\circ < \theta \leq 20^\circ$, $20^\circ < \theta \leq 27^\circ$ และ $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ขณะที่มาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] แบ่งช่วงความชันหลักเพียงสองช่วง คือ $7^\circ < \theta \leq 27^\circ$ และ $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ความแตกต่างดังกล่าวอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม โดยเฉพาะในช่วงความชันใกล้เคียงของแต่ละช่วง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาหลังคาทรงจั่วที่ความชัน 18.4° และ 26.7° ซึ่งอยู่ในช่วงรอยต่อของการแบ่งช่วงตามมาตรฐาน

นอกจากนี้ ปัจจุบันมีการใช้งานอาคารเตี้ยที่มีรูปทรงหลังคาหลากหลายมากขึ้น เช่น หลังคาโค้ง แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 1 งานวิจัยของ Zhang et al [8] และ Wood and Lynar [9] ต่างระบุตรงกันว่า หลังคาโค้งมีพฤติกรรมอากาศพลศาสตร์ที่ซับซ้อนและได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการกระจายตัวของความดันลมเชิงสามมิติ อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมดังกล่าวยังไม่ได้ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจนในมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] แม้ว่ากฎกระทรวง พ.ศ. 2566 และประกาศกระทรวงมหาดไทยฉบับล่าสุดจะอ้างอิงมาตรฐานดังกล่าวในการคำนวณแรงลมก็ตาม ขณะที่มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] ได้กำหนดแนวทางการออกแบบสำหรับหลังคารูปทรงโค้งไว้อย่างชัดเจน ช่องว่างดังกล่าวจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม ยิ่งไปกว่านั้น การประเมินแรงลมสำหรับโครงสร้างรองจากการทดสอบในอุโมงค์ลม คือความแม่นยำในการแปลงค่าความดันลมจากจุดวัด (Pressure taps) ที่มีการจัดเรียงแบบไม่สม่ำเสมอไปสู่พื้นที่รับลมย่อย งานวิจัยล่าสุด Gierson et al [10] ได้พิสูจน์แล้วว่า แผนภาพโวโรนอย (Voronoi diagram) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมที่สุดในการกำหนดพื้นที่รับผิวด้านของจุดวัดแรงดันแต่ละจุดอย่างเป็นระบบ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมแรงลมที่กระทำต่ออาคารเตี้ยที่มีหลังคาทรงจั่ว ความชัน 18.4° และ 26.7° และหลังคาโค้งที่มีความชันสัมประสิทธิ์เทียบเท่า 18° โดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม โดยการประยุกต์ใช้แผนภาพโวโรนอยในการรวมพื้นที่รับแรงย่อยเพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมอย่างละเอียดใน 3 ระดับ ได้แก่ (1) ระดับจุดวัดแรงดัน (Local point load) (2) ระดับเฉลี่ยบนพื้นผิวแต่ละด้าน (Panel load) และ (3) ระดับเฉลี่ยตามพื้นที่รับลม (Tributary area) ผลลัพธ์จากการศึกษาได้ถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ ASCE 7-22 [5] เพื่อประเมินความปลอดภัย ข้อจำกัด และสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับพฤติกรรมอากาศพลศาสตร์ของหลังคาโค้ง อันจะเป็นรากฐานสำคัญในการปรับปรุงข้อกำหนดการออกแบบแรงลมสำหรับประเทศไทยต่อไป



รูปที่ 1 ตัวอย่างอาคารชาเลนเจอร์ฮอลล์ เมืองทองธานี เป็นอาคารเตี้ยขนาดใหญ่ หลังคาโค้ง ซึ่งยังไม่มีระบุในมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7]

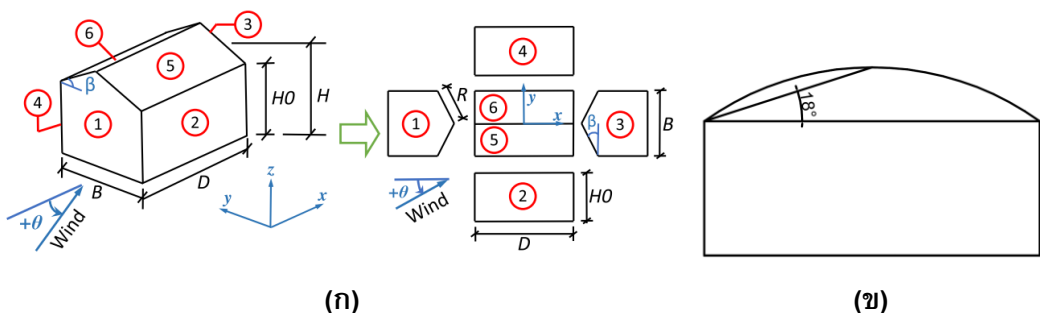
2. วิธีวิจัยและการทดสอบแบบจำลอง

2.1 การจำลองลักษณะลมในอุโมงค์ลม

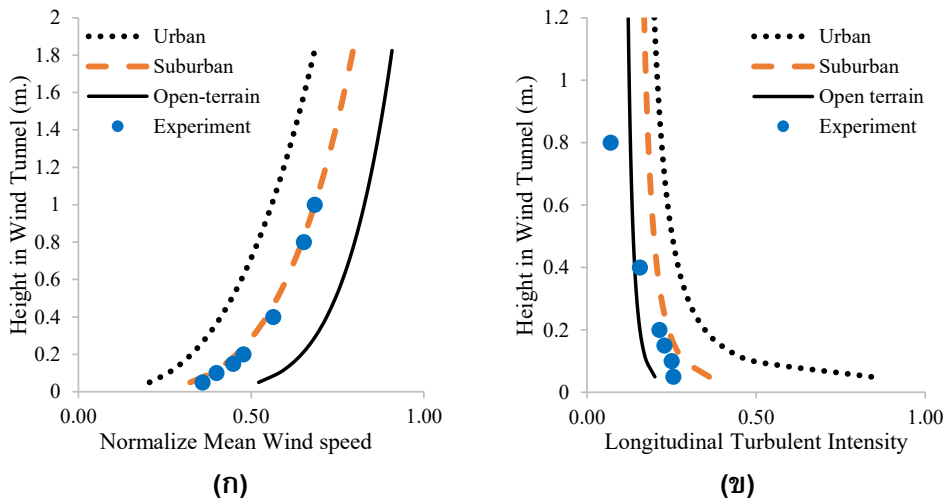
การทดสอบแบบจำลองดำเนินการในอุโมงค์ลมแบบปิด (Closed-circuit wind tunnel) ณ ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลมธรรมชาติ-เอไอที (TU-AIT Wind Tunnel Laboratory) ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่วงทดสอบ (Test section) กว้าง 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร และมีความยาว 25.5 เมตร สภาพการไหลของลมถูกจำลองให้สอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง (Suburban terrain exposure) ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASCE7-22 [5] โดยการจัดเรียงบล็อกสร้างความขรุขระ (Roughness elements) บนพื้นอุโมงค์ลม เพื่อสร้างชั้นขอบเขตบรรยากาศ (Atmospheric Boundary Layer: ABL) ที่มีค่าเลขชี้กำลังของความเร็วลม (Power-law exponent, α) เท่ากับ 0.25 โปรไฟล์ความเร็วลมเฉลี่ยและระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ได้รับการสอบเทียบให้สอดคล้องกับเป้าหมายทางทฤษฎี เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองได้รับอิทธิพลของความผันผวนของกระแสลมที่เสมือนจริงตามธรรมชาติ



รูปที่ 2 อุโมงค์ลม ธรรมชาติ-เอไอที และแบบจำลองอาคารเดี่ยว



รูปที่ 3 (ก) รายละเอียดขนาดอาคาร พื้นผิวแต่ละด้าน และทิศทางลม (ข) นิยามความชันหลังคาเทียบเท่า



รูปที่ 4 การจำลองลักษณะลมตามความสูงและสภาพภูมิประเทศในอุโมงค์ลม
(ก) ค่าความเร็วลมเฉลี่ย (ข) ค่าอัตราส่วนความปั่นป่วน

2.2 รายละเอียดแบบจำลองอาคาร

แบบจำลองอาคารเตี้ยทำจากอะคริลิกใสด้วยมาตราส่วน 1:80 โดยอ้างอิงขนาดอาคารจริงที่ความกว้าง 25 เมตร ความลึก 40 เมตร และความสูงถึงระดับชายคา 10 เมตร การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยแบบจำลอง 3 รูปแบบ ได้แก่ หลังคาทรงจั่วที่มีความชัน 18.4° และ 26.7° และหลังคาโค้งที่มีความชันสัมประสิทธิ์เทียบเท่า 18° เพื่อศึกษาพฤติกรรมดังตารางที่ 1 และรูปที่ 5 แบบจำลองทั้งหมดถูกติดตั้งด้วยจุดวัดแรงดัน (pressure taps) ทั้งหมด 362 จุด โดยแบ่งจุดตามด้านต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลอง	ลักษณะหลังคา	B(m)	D(m)	H0(m)	ความชัน
GBC1	หลังคาจั่ว	25	40	10	18.4°
GBC2	หลังคาจั่ว	25	40	10	26.7°
ARC1	หลังคาโค้ง	25	40	10	เทียบเท่า 18°



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 แบบจำลองที่ติดตั้งในอุโมงค์ลม (ก) หลังคาจั่วความชัน 18.4° (ข) หลังคาจั่วความชัน 26.7° (ค) หลังคาโค้งความชันเทียบเท่า 18°

ตารางที่ 2 จุดวัดแรงดัน

ด้าน	S1	S2	S3	S4	S5	S6
จำนวนจุด	37	51	37	42	125	70

ในการตั้งค่าการทดสอบ อัตราส่วนการขวางกั้นกระแสน้ำ (Blockage ratio) ของแบบจำลองต่อพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลมมีค่าน้อยกว่า 1% ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์ 8% ตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] จึงพิจารณาว่าอิทธิพลจากการขวางกั้น (Blockage effects) มีนัยสำคัญน้อยมากและไม่จำเป็นต้องทำการปรับแก้ (Blockage correction) ประเด็นสำคัญในการทดสอบอุโมงค์ลมเพื่อศึกษาผลของแรงลมบนหลังคารูปทรงโค้ง คืออิทธิพลของค่า Re ที่มีต่อการไหลรอบโครงสร้างและแรงดันลมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว Uematsu and Yamamura [11] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่า Re ต่อการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมบนหลังคาโค้งอิสระในชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) โดยค่า Re ถูกนิยามโดยอาศัยความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูงเฉลี่ยของแบบจำลอง U_h และสองเท่าของรัศมีความโค้งหลังคา ($2R$) ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับที่ใช้ในการศึกษาของ Natalini et al [12] เหตุผลที่เลือกใช้ $2R$ แทนการใช้ H เป็นความยาวอ้างอิง (Characteristic length) ในการกำหนดค่า Re นั้น เพื่อเชื่อมโยงพฤติกรรมการไหลรอบหลังคาโค้งอิสระกับการไหลรอบทรงกระบอก โดยทั่วไปมักใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง (เท่ากับสองเท่าของรัศมี) ในการคำนวณค่า Re งานวิจัยดังกล่าวพบว่า การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมบนพื้นผิวหลังคาไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า Re เมื่อ $Re > 1.0 \times 10^5$ สอดคล้องกับ Macdonald et al [13] ที่ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากอุโมงค์ลมกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริง (Full-scale measurement) จากไซโลภายใต้สภาพลมธรรมชาติ พบว่า $Re > 1.0 \times 10^5$ สามารถจำลองสภาวะของอาคารจริงได้อย่างสมเหตุสมผล

การทดสอบในงานวิจัยนี้ค่า Re นิยามจาก $U_H(6.81\text{m/s})$ และ $2R(0.43\text{m})$ มีค่าเท่ากับ 1.64×10^5 ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้จำลองพฤติกรรมแรงลมในสภาวะการใช้งานจริงได้อย่างสมเหตุสมผล

2.3 ระบบการรับข้อมูลความดันลม

แบบจำลองถูกทดสอบภายใต้ความเร็วลมอ้างอิงที่ความสูงเฉลี่ยของแบบจำลอง โดยมีค่าเท่ากับ 6.81 เมตร/วินาที การทดสอบครอบคลุมทิศทางลมตั้งแต่มุม -90° ถึง 90° โดยเพิ่มทีละ 10° รวมทั้งทิศทางลมเฉียงที่มุม $\pm 45^\circ$ สัญญาณความดันลมถูกบันทึกด้วยความถี่ 100 เฮิรตซ์ (Hz) เป็นระยะเวลา 5 นาทีต่อหนึ่งทิศทางลม ทั้งนี้ สัญญาณความดันลมที่บันทึกได้ผ่านการปรับแก้ฟังก์ชันการถ่ายโอนของท่อลม (Tubing transfer function correction) เพื่อขจัดความคลาดเคลื่อนจากการสั่นพ้อง (Acoustic resonance) ภายในสายท่อวัดความดัน ทำให้ได้ค่าความดันลมพลวัตที่ถูกต้อง

3. การวิเคราะห์แรงลมโดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

3.1 การแบ่งพื้นที่ที่รับผิวด้านของแต่ละจุดวัด

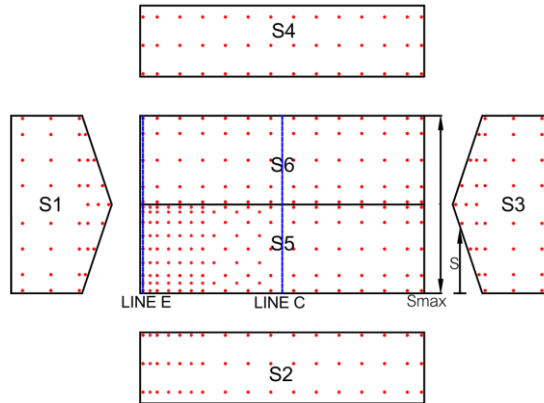
ในปี ค.ศ. 2017 Gierson et al [10] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของอาคารเตี้ยหลังคาทรงจั่ว โดยใช้แนวทางการกำหนดพื้นที่รับลมของแต่ละจุดวัดแรงดันด้วยแผนภาพไวโรนอยวิธีการดังกล่าวอาศัยหลักการแบ่งสามเหลี่ยมเดลอนเน (Delaunay triangulation) ซึ่งเสนอโดย Delaunay [14] เป็นพื้นฐานในการสร้างโครงข่ายของจุดวัดแรงดัน

การแบ่งสามเหลี่ยมเดลอนเนเป็นกระบวนการเชื่อมต่อจุดวัดแรงดันเพื่อสร้างชุดของสามเหลี่ยมที่มีคุณสมบัติสำคัญ ได้แก่ (1) สามเหลี่ยมไม่ทับซ้อนกัน (2) ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่กำหนดโดยกลุ่มจุดวัดแรงดัน และ (3) ไม่มีจุดวัดแรงดันใดอยู่ภายในวงกลมล้อมรอบ (Circumcircle) ของสามเหลี่ยมแต่ละรูป

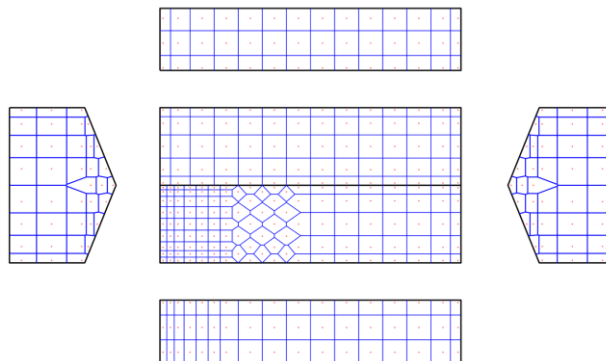
จากโครงข่ายสามเหลี่ยมดังกล่าว สามารถสร้างแผนภาพไวโรนอยได้โดยการลากเส้นแบ่งครึ่งตั้งฉาก (Perpendicular bisector) ของด้านสามเหลี่ยมแต่ละด้าน พื้นที่ที่เกิดขึ้นจะกำหนดขอบเขตอิทธิพลของจุดวัดแรงดันแต่ละจุด โดยพื้นที่นั้นประกอบด้วยตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับจุดวัดแรงดันดังกล่าวมากกว่าจุดอื่น

แผนภาพไวโรนอยจึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดพื้นที่รับผิวด้าน (Tributary area) ของแต่ละจุดวัดแรงดันอย่างเป็นระบบและเป็นกลาง เนื่องจากผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับตำแหน่งเชิงเรขาคณิตของจุดวัดเท่านั้น และไม่ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ใช้ สามารถใช้เครื่องมือคำสั่ง Voronoi

ในโปรแกรม MATLAB โดยแสดงตัวอย่างตำแหน่งจุดวัดแรงดันแสดงดังรูปที่ 6 และตัวอย่างผลการสร้างแผนภาพไวโรนอยแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 รายละเอียดจุดวัดของแบบจำลองหลังคาจั่วที่ความชัน 18.4°



รูปที่ 7 การแบ่งพื้นที่รับลมของจุดวัดความดันหลังคาจั่วที่ความชัน 18.4° ด้วยแผนภาพไวโรนอย

3.2 การคำนวณแรงลมเฉพาะที่โดยการทดสอบรวบรวมผลของแรงดัน

ค่าความดันที่ได้จากการทดสอบจะต้องเป็นค่าความดันที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั่วทั้งแบบจำลองของโครงสร้าง โดยค่าความดันที่อ่านได้จากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมจะถูกเก็บข้อมูลไว้และนำมาปรับแก้ให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมตามสมการ

$$C_p = \frac{(P_x - P_0)}{q} \quad (1)$$

$$q = \frac{1}{2} \rho U_r^2 \quad (2)$$

โดยที่ C_p คือค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (Pressure coefficient) P_x คือ ความดันลมที่วัดได้ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนแบบจำลอง P_0 คือ ค่าความดันลมสถิต (Static pressure or barometric pressure) ณ ตำแหน่งอ้างอิงที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่เรียกว่า หลอดพิโทต์ความดันสถิต (Pitot static tube) q คือ ค่าความดันลมพลวัต (Dynamic pressure) ณ ตำแหน่งอ้างอิง ที่วัดได้จากหลอดพิโทต์ความดันสถิต U_r คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ย ณ ตำแหน่งอ้างอิงเฉลี่ย ρ คือ ค่าความหนาแน่นของมวลอากาศ

ค่าหน่วยแรงดันและหน่วยแรงดูดอาจมีค่าแตกต่างกันได้จากการวัดแต่ละครั้ง เนื่องจากเป็นหน่วยแรงลมพลศาสตร์ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น จึงนำค่าไปทำการวิเคราะห์หาค่าปลายสุด (Extreme value analysis) ด้วยวิธีการกระจายตัวแบบกัมเบล (Gumbel distribution) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมปลายสุดที่มีความน่าเชื่อถือทางสถิติและเหมาะสมสำหรับการนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบ

3.3 การคำนวณแรงลมค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่โดยการทดสอบรวบรวมผลของแรงดัน

ในปี ค.ศ. 2015 Duthinh et al [15] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมอาคารเดี่ยวหลังคารูปทรงจั่วสำหรับโครงสร้างรองรับ โดยการรวมพื้นที่รับแรงย่อย (Tributary area) แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความดันใช้วิธีการคำนวณค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) สำหรับข้อมูลซีรีส์เวลาแรงดันสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$C_p(i, t) = \text{avg} [C_{p_{ori}}(i, t - \Delta t), C_{p_{ori}}(i, t), C_{p_{ori}}(i, t + \Delta t)] \quad (3)$$

$$p_{ori}(i, t) = p_i(t) - p_0 \quad (4)$$

$$C_{p_{ori}}(i, t) = \frac{p_{ori}(i, t)}{(0.5 \rho V_{3600}^2)} \quad (5)$$

โดยที่กำหนดให้ช่วงเวลากการเก็บข้อมูลเป็น t และค่าความดันสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวัดที่จุดวัดแรงดัน i ณ เวลา t โดยที่ p_{ori} คือค่าความดันสุทธิที่จุดวัดแรงดันเหนือความดันบรรยากาศ ซึ่งได้จากการลบค่าความดันบรรยากาศคงที่ p_0 ที่ระดับความสูงเฉลี่ยของหลังคา H ออกจากค่าความดันลมที่วัดได้ $p_i(t)$ และ $C_{p_{ori}}$ คือ ค่าความดันสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้โดยการหารค่า

ความดันสุทธิของจุดวัดแรงดันด้วยค่าความดันไดนามิกอ้างอิง ซึ่งอ้างอิงจากความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง V_{3600} ที่ระดับความสูง H และค่าความหนาแน่นของอากาศ ρ

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม $C_p C_g(j, t)$ สำหรับแต่ละพื้นที่ที่ถูกสร้างขึ้นจากแผนภาพไวโรนอย ดังหัวข้อที่ 3.1 ในทิศทางลม θ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมตามพื้นที่ $C_p(i, t)$ ตามช่วงเวลาได้ โดยพิจารณาพื้นที่ที่รับผิวดมของจุดวัดความดัน (Tributary areas) ที่ทับซ้อนกันแต่ละพื้นที่ ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$C_p C_g(j, t) = \frac{\left[\sum a_i C_p(i, t) \right]}{A_j} \quad (6)$$

$$A_j = \sum a_i \quad (7)$$

โดยที่ $C_p C_g$ คือค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมตามพื้นที่ที่ถูกคำนวณโดยใช้พื้นที่อิทธิพล a_i ของจุดวัดทั้งหมด i ที่ทับซ้อนกับพื้นที่ทั้งหมด A_j พื้นที่ทั้งหมดใด ๆ ที่ทับซ้อนกันกับพื้นที่ที่รับผิวดมของจุดวัดบางส่วนจะใช้เพียงส่วนที่ทับซ้อนกันเท่านั้น พื้นที่ที่รับผิวดมเหล่านี้จะถูกคูณกับค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม $C_p(i, t)$ ของแต่ละจุดวัด และผลรวมจะถูกหารด้วยพื้นที่ตารางที่กำลังพิจารณา A_j

4. ผลการทดสอบแบบจำลองหลังคาทรงจั่วและโค้งในอุโมงค์ลม

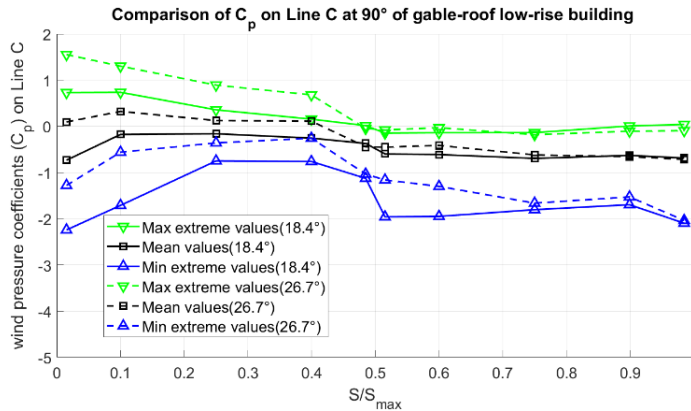
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของแต่ละจุดวัด (Local point load)

เพื่ออธิบายพฤติกรรมของลมที่กระทำต่อหลังคา ในรูปที่ 6 ระบุแนวจุดวัดที่กึ่งกลาง และขอบของหลังคา แสดงออกมาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย ต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางหลังคาที่ทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา (90°) ดังรูปที่ 8 และ 9 และที่ตำแหน่งขอบของหลังคาที่ทิศทางลม 45° หรือที่มุมเฉียงกับสันหลังคาดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบดังต่อไปนี้

4.1.1 กรณีทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา (90°)

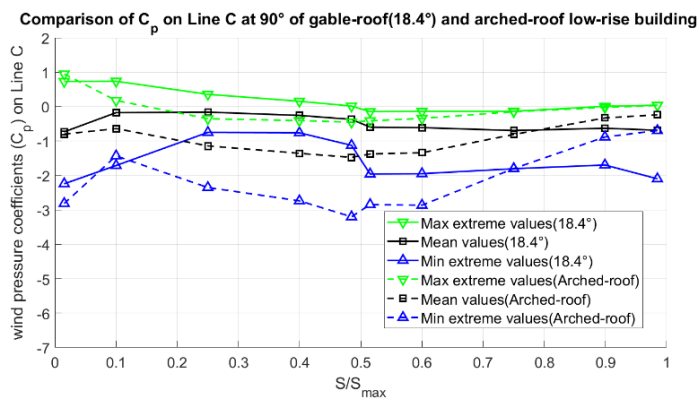
ผลการทดสอบในทิศทางด้านต้นลม ($S/S_{max} < 0.5$) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยของหลังคาจั่วที่ความชัน 26.7° เป็นแรงดันซึ่งแตกต่างกันกับความชัน 18.4° ที่เป็นแรงดูด ในขณะที่ด้านท้ายลม ($S/S_{max} > 0.5$) มีค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดใกล้เคียงกันดังรูปที่ 8 พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากลักษณะการไหลของลมเมื่อกระทบผิวหลังคา มุมปะทะที่

สูงขึ้น 26.7° ทำให้กระแสลมไหลแยกตัวออกจากผิวหลังคาเร็วขึ้น ส่งผลให้บริเวณแรงดูดสูงสุดกระจายตัวมากขึ้นและสิ่งที่เป็นแรงดูดสูงสุดลดลงเมื่อเทียบกับความชัน 18.4°



รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งกลางหลังคาทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคาสำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°

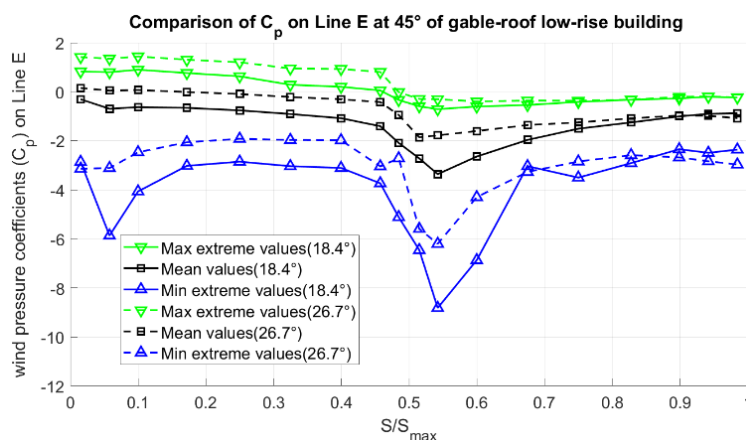
เมื่อเปรียบเทียบหลังคาโค้งความชันเทียบเท่า 18° กับหลังคาทรงจั่วความชัน 18.4° ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหลังคาพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดที่หลังคาด้านต้นลมของหลังคาโค้งมากกว่าด้านท้ายลม และมากกว่าหลังคารูปทรงจั่วอย่างชัดเจนที่ด้านต้นลมเนื่องจากรูปทรงโค้งช่วยให้กระแสลมไหลเกาะผิวและเร่งความเร็วได้อย่างต่อเนื่องตลอดแนวหลังคา ขณะที่หลังคาจั่วมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงบริเวณสันหลังคาซึ่งก่อให้เกิดการแยกตัวของกระแสลมแสดงดังรูปที่ 9



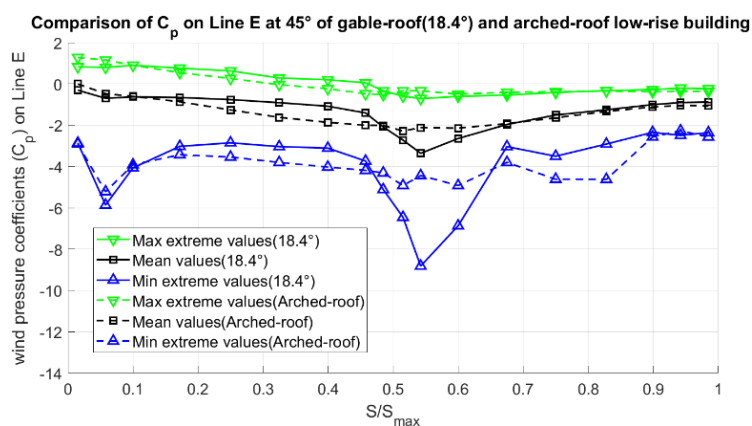
รูปที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งกลางหลังคาทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคาสำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และหลังคาโค้งที่ความชันเทียบเท่า 18°

4.1.2 กรณีทิศทางลมเฉียงทำมุม 45° กับสันหลังคา

ผลการศึกษาพบว่า บริเวณขอบหลังคาเป็นตำแหน่งที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงมากสำหรับทั้งหลังคาทรงจั่วทั้งสองความชันและหลังคาโค้ง อันเนื่องมาจากการแยกตัวของการไหล (Flow separation) บริเวณขอบอาคาร โดยเฉพาะในช่วงด้านท้ายลมที่อยู่ใกล้สันหลังคา ($0.5 < S/S_{\max} < 0.6$) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11 ซึ่งแตกต่างจากกรณีในหัวข้อ 4.1.1 ที่พิจารณาบริเวณกึ่งกลางของหลังคา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดมีแนวโน้มแปรผันสูงขึ้นอย่างชัดเจนในบริเวณมุมท้ายลมที่อยู่ใกล้สันหลังคา



รูปที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งขอบหลังคาทิศทางลมเฉียง 45°กับสันหลังคาสำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°



รูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งขอบหลังคาทิศทางลมเฉียง 45° กับสันหลังคาสำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และหลังคาโค้งที่ความชันเทียบเท่า 18°

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคา พบว่ากรณีลมเฉียง 45° ก่อให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงสุด บนหลังคาสูงกว่าที่บริเวณมุมท้ายลม เนื่องจากการไหลของอากาศเกิดการแยกตัว (flow separation) พร้อมกันบริเวณขอบหลังคาสองด้านที่อยู่เหนือลม ส่งผลให้เกิดกระแสลมบริเวณมุมหลังคา ในทางตรงกันข้าม เมื่อลมพัดตั้งฉากกับสันหลังคา การไหลของลมมีลักษณะสมมาตรมากกว่าและเกิดการแยกตัวของกระแสลมในลักษณะที่สม่ำเสมอกว่า ส่งผลให้การกระจายความดันบนหลังคาไม่รุนแรงเท่ากรณีลมเฉียง 45°

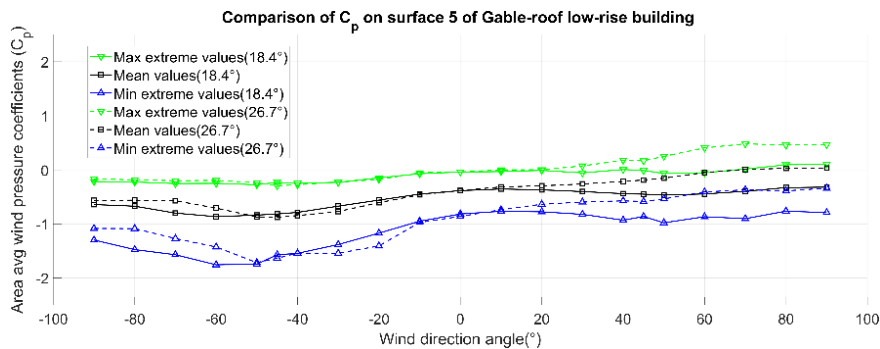
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวทั้งหมดแต่ละด้าน (Area average for panel load)

ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวแต่ละด้านของหลังคาถูกวิเคราะห์ในทุกมุมการทดสอบ ตั้งแต่มุม -90° ถึง 90° โดยเพิ่มทีละ 10° และทำการทดสอบเพิ่มเติมที่มุมเฉียง -45° และ 45° เพื่อประเมินพฤติกรรมในกรณีลมปะทะเฉียง

4.2.1 หลังคาทรงจั่ว

สำหรับหลังคาทรงจั่วที่ความชัน 18.4° และ 26.7° ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า บริเวณด้านท้ายลม (ช่วงมุม -90° ถึง 0°) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของทั้งสองความชันมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยค่าแรงดูดเฉลี่ยสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงมุม -60° ถึง -45° ซึ่งสอดคล้องกับกรณีลมเฉียงด้านท้ายลมที่ก่อให้เกิดการไหลแยกตัวและการก่อตัวของกระแสนบริเวณสันและขอบหลังคา ส่งผลให้เกิดความดันลบสูงกว่ามุมอื่น

ในทางกลับกันบริเวณด้านต้นลม (ช่วงมุม 0° ถึง 90°) หลังคาที่มีความชัน 26.7° ให้ค่าแรงดูดเฉลี่ยต่ำกว่าหลังคาความชัน 18.4° อย่างชัดเจน และที่มุม 90° ซึ่งเป็นกรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคา ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยหลังคาความชัน 26.7° มีค่าใกล้ศูนย์ แสดงให้เห็นถึงลักษณะสมมาตรของการไหลและการกระจายความดันที่สมดุลระหว่างสองด้านของหลังคา ดังแสดงในรูปที่ 12

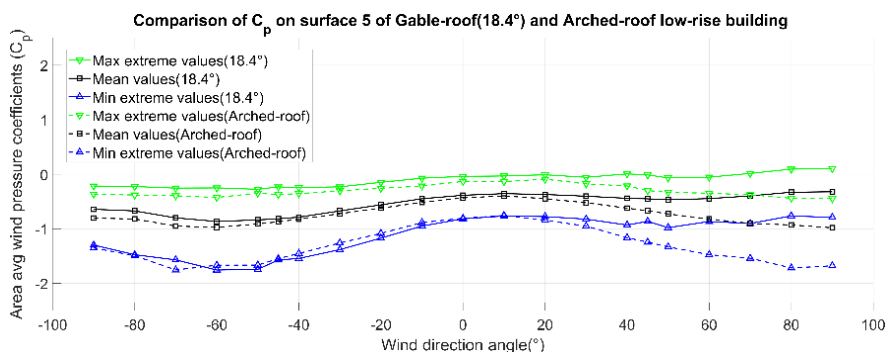


รูปที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย ต่ำสุด และสูงสุดที่เฉลี่ยบนพื้นผิวหลังคารูปทรงจั่วด้านที่ 5 ความชัน 18.4° และ 26.7°

4.2.2 หลังคาโค้ง

พบว่าบริเวณด้านต้นลม หลังคาโค้งให้ค่าแรงดูดเฉลี่ยสูงกว่าด้านท้ายลมอย่างเด่นชัด ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของหลังคาทรงจั่ว ลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการเร่งความเร็วของกระแสลมตามแนวผิวโค้งที่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ความดันสถิตลดลงมากบริเวณด้านต้นลม

ขณะที่บริเวณด้านท้ายลมของหลังคาโค้งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับหลังคาทรงจั่วความชัน 18.4° ค่าแรงดูดสูงสุดของหลังคาโค้งเกิดขึ้นในช่วงมุม -70° ถึง -50° ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งเป็นช่วงมุมลมเฉียดที่ก่อให้เกิดการรวมตัวของกระแสนบริเวณขอบหลังคาอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย ต่ำสุด และสูงสุดที่เฉลี่ยบนพื้นผิวหลังคารูปทรงจั่วและโค้งด้านที่ 5 ความชัน 18.4° และเทียบเท่า 18°

4.2.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวทั้งหมดระหว่างผลการทดสอบอุโมงค์ลมกับมยผ.1311-50 [7] และ ASCE 7-22 [5]

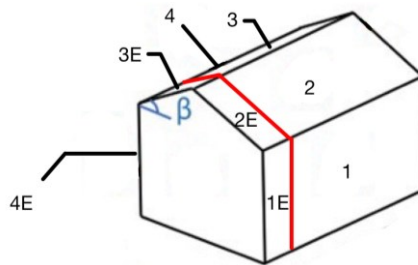
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบอุโมงค์ลมกับมาตรฐานการออกแบบ มยผ.1311-50 [7] และ ASCE 7-22 [5] พบว่า หลังคาทรงจั่วให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมที่สอดคล้องและอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานสำหรับทุกทิศทางลม ดังตารางที่ 3 และ 4 โดยแบ่งพื้นที่ตามมาตรฐานได้ดังรูปที่ 14

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร กรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคาบนพื้นที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองหลังคารูปทรงจั่วที่ความชัน 26.7° เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ ASCE7-22 [5]

ความลาดชันของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร							
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E
30° - 45° มยผ.1311-50 [7]	1.05	1.3	0.4	0.5	-0.8	-1.0	-0.7	-0.9
30° - 45° ASCE7-22 [5]	1.29	1.59	0.49	0.62	-0.99	-1.22	-0.85	-1.11
30° ASCE7-22 [5] (Dir)	1.6		0.4		-1.2		-1.0	
26.7° การทดสอบ	S2		S5		S6		S4	
	1.2		0.5		-1.0		-0.93	

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร กรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคาบนพื้นที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองหลังคารูปทรงจั่วที่ความชัน 18.4° และหลังคาโค้งความชันเทียบเท่า 18° เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ ASCE7-22 [5]

ความลาดชันของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร							
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E
20° มยผ.1311-50 [7]	1.00	1.50	-1.30	-2.00	-0.90	-1.30	-0.80	-1.20
20° ASCE7-22 [5]	1.22	1.85	-1.59	-2.47	-1.11	-1.59	-0.99	-1.48
20° ASCE7-22 [5] (Dir)	1.6		-0.80		-1.2		-1.0	
หลังคาจั่ว 18.4° การทดสอบ	S2		S5		S6		S4	
	1.2		-0.79		-1.42		-0.78	
หลังคาโค้งเทียบเท่า 18° การทดสอบ	1.2		-1.70		-1.37		-0.50	



รูปที่ 14 พื้นที่รับแรงลมตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ ASCE7-22 [5]

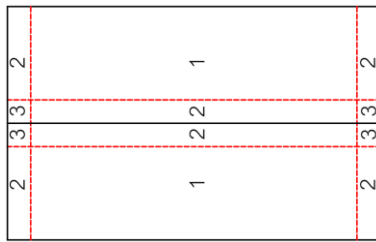
ในขณะที่หลังคาโค้งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับมาตรฐานโดยรวม ยกเว้นบริเวณด้านต้นลม (โซน S5) ซึ่งให้ค่าแรงดูดสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด สาเหตุเนื่องจากมาตรฐานอ้างอิงพฤติกรรมของหลังคาทรงจั่วเป็นหลัก จึงไม่สามารถสะท้อนลักษณะการเร่งความเร็วของกระแสลมบนผิวโค้งที่ต่อเนื่องได้ดังตารางที่ 4

มาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ NBCC-2020 [16] ให้ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักที่เท่ากัน (Dir) หมายถึงวิธีทิศทาง (Directional) ตามมาตรฐาน ASCE 7-22 [5] ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ย และงานวิจัยนี้สมมุติค่า C_g เท่ากับสองเพื่อคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด

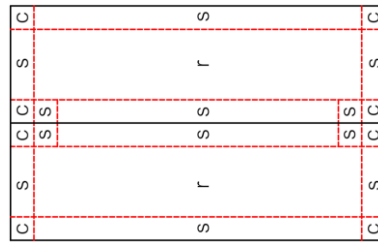
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยตามพื้นที่รับลม

ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวแต่ละด้านถูกนำเสนอโดยอ้างอิงการแบ่งพื้นที่รับลมตามมาตรฐาน ได้แก่ มยผ.1311-50 [7], ASCE 7-22 [5] และ NBCC 2020 [16] เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างผลการทดสอบกับแนวทางการออกแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

มาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] แบ่งช่วงความชันหลังคาออกเป็น 2 ช่วงหลัก คือ $7^\circ < \theta \leq 27^\circ$ และ $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ขณะที่ ASCE 7-22 [5] (เช่นเดียวกับ ASCE 7-16 [6]) แบ่งช่วงความชันละเอียดกว่า ได้แก่ $\theta < 7^\circ$, $7^\circ < \theta \leq 20^\circ$, $20^\circ < \theta \leq 27^\circ$ และ $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ พร้อมทั้งกำหนดการแบ่งโซนพื้นที่รับลมแตกต่างจาก มยผ.1311-50 [7] อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 15 งานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการทดลองตามการแบ่งโซนพื้นที่รับลมของแต่ละมาตรฐานตามรูปที่ 16 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้โดยตรง

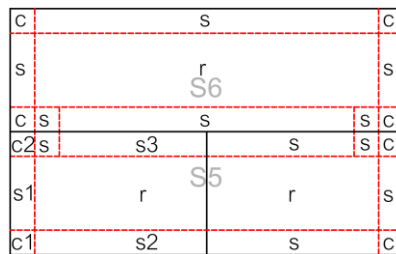


(ก)



(ข)

รูปที่ 15 การแบ่งโซนพื้นที่รับลมของหลังคาจั่ว (ก) มาตรฐาน ASCE7-22 [5] (ข) มาตรฐาน มยผ.1311-50 [7]



รูปที่ 16 รายละเอียดการแบ่งโซนพื้นที่รับลมจากผลการทดสอบ ตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 [7]

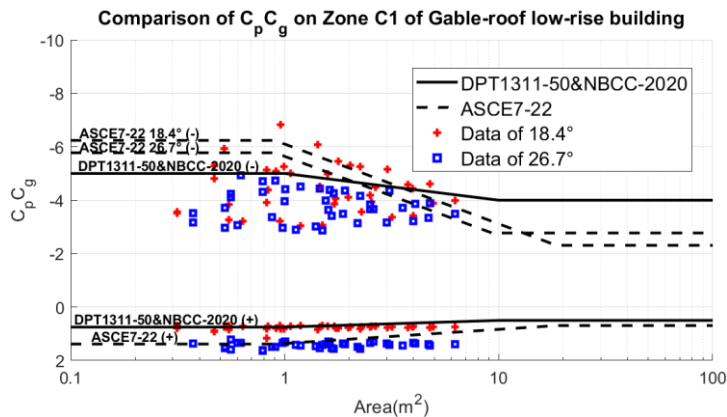
4.3.1 บริเวณมุมหลังคาด้านล่างและด้านบน (C1 และ C2)

ผลการทดสอบสำหรับหลังคาทรงจั่วพบว่า บริเวณมุมบน (C2) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงกว่าบริเวณมุมล่าง (C1) อย่างชัดเจน ทั้งในกรณีความชัน 18.4° และ 26.7° ดังรูปที่ 17 และ 18 โดยเฉพาะที่ความชัน 18.4° ซึ่งให้ค่าแรงดูดสูงกว่าความชัน 26.7° อย่างมีนัยสำคัญ

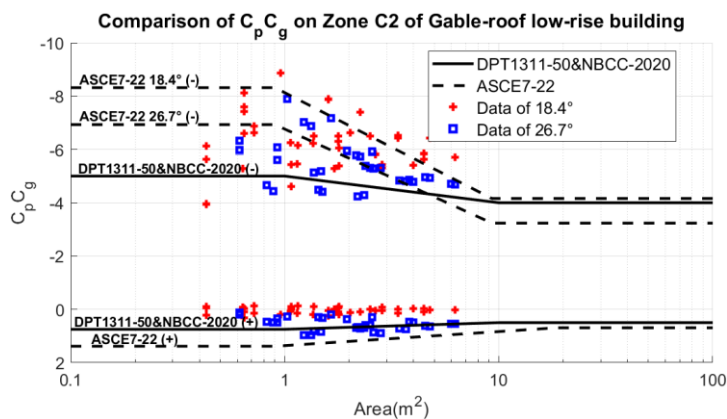
พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับกลไกการไหลบริเวณสันหลังคา ซึ่งเกิดการแยกตัวของกระแสลมและการก่อตัวของกระแสวนตามแนวสัน ส่งผลให้บริเวณมุมบนเกิดความดันลบสูงกว่า

แนวโน้มนี้สอดคล้องกับ ASCE 7-22 [5] ที่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมแตกต่างกันสำหรับช่วงความชัน 20° - 27° และ 27° - 45° รวมทั้งกำหนดโซนมุมบนและมุมล่างแยกจากกัน ขณะที่ มยผ.1311-50 [7] กำหนดช่วงความชันกว้างกว่า อาจไม่สะท้อนความแตกต่างเชิงพฤติกรรมที่พบจากการทดลองได้ละเอียดเท่ามาตรฐาน ASCE 7-22 [5]

นอกจากนี้มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] กำหนดให้โซนมุมล่างใช้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเดียวกับขอบด้านข้าง (S1) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่พบว่า ค่าแรงดูดบริเวณมุมล่างมีค่าต่ำกว่ามุมบนอย่างชัดเจนดังรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่มุมล่าง (C1) สำหรับหลังคารูปทรงจั่ว ความชัน 18.4° และ 26.7°

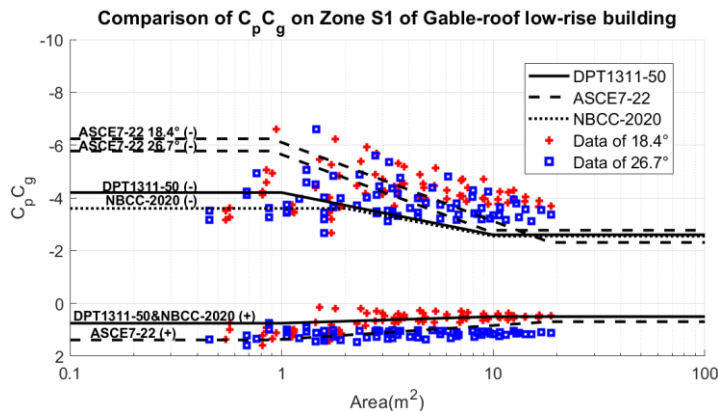


รูปที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่มุมบน (C2) สำหรับหลังคารูปทรงจั่ว ความชัน 18.4° และ 26.7°

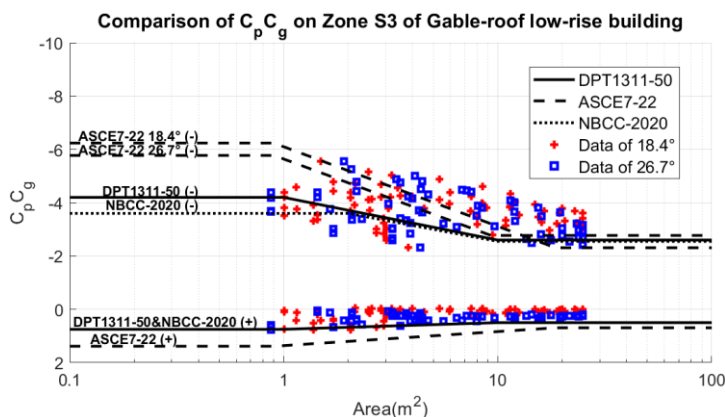
4.3.2 บริเวณขอบด้านข้างและขอบด้านบน (S1 และ S3)

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในพื้นที่ขอบด้านข้าง(S1) และ ขอบด้านบน(S3) ดังรูปที่ 19 และ 20 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมมีแนวโน้มสอดคล้องกับ ASCE 7-22 [5] มาก

ในขณะที่ค่าที่กำหนดใน มยผ.1311-50 [7] และ NBCC 2020 [16] มีแนวโน้มต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากการทดสอบ โดยเฉพาะในกรณีลมเฉียงที่ก่อให้เกิดกระแสวนบริเวณขอบหลังคาซึ่งอาจสะท้อนว่าโครงสร้างการแบ่งโซนในสองมาตรฐานนี้ยังไม่ครอบคลุมผลกระทบจากลมในบริเวณขอบด้านข้างและขอบด้านบนติดกับสันหลังคาดังรูปที่ 19 และ 20



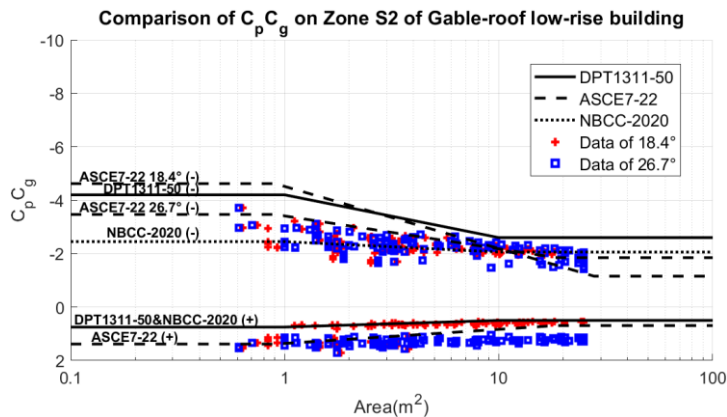
รูปที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านข้าง (S1) สำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°



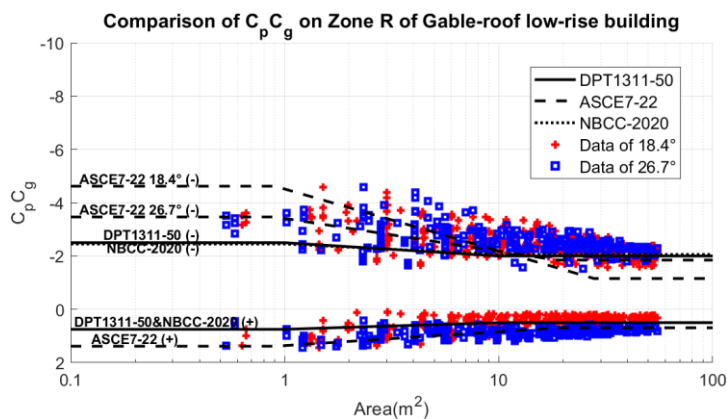
รูปที่ 20 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านบน (S3) สำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°

4.3.3 บริเวณขอบด้านล่างและพื้นที่หลังคาทั่วไป (S2 และ r)

มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] รวมพื้นที่ขอบด้านล่าง(S2) และพื้นที่หลังคา(r) เป็นพื้นที่เดียวกัน ขณะที่ มยผ.1311-50 [7] และ NBCC 2020 [16] แยกสองพื้นที่นี้ออกจากกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ขอบด้านล่าง(S2) ให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมต่ำกว่าโซนพื้นที่หลังคาทั่วไป (r) อย่างสม่ำเสมอ สอดคล้องกับแนวทางของ NBCC 2020 [16] ที่กำหนดค่าของ S2 ใกล้เคียงกับผลการทดสอบดังรูปที่ 21 และ 22 ผลการศึกษาพบว่า การรวมโซน S2 และ R เป็นพื้นที่เดียวกันตาม ASCE 7-22 [5] อาจให้ค่าที่อนุรักษ์นิยม (conservative) สำหรับบริเวณขอบด้านล่าง ขณะที่แนวทางของ NBCC 2020 [16] มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงมากกว่าในกรณีนี้



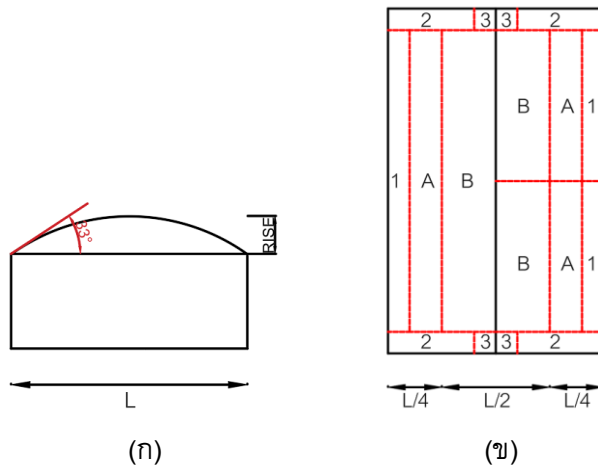
รูปที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านล่าง (S2) สำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°



รูปที่ 22 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่หลังคาทั่วไป (r) สำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°

4.3.4 หลังคาโค้งที่ความชันสัมประสิทธิ์เทียบเท่า 18°

สำหรับหลังคาโค้ง เนื่องจากมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ NBCC 2020 [16] ยังไม่มีข้อกำหนดเฉพาะสำหรับรูปทรงหลังคาประเภทนี้ งานวิจัยนี้จึงอ้างอิงหลักเกณฑ์การแบ่งโซนพื้นที่รับลมตาม มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] เป็นกรอบในการวิเคราะห์ แบบจำลองหลังคาโค้งมีค่า r เฉลี่ย = ระยะยกหลังคา (rise) ต่อช่วงหลังคา (L) (rise-to-span ratio) ความชันบริเวณชายคา และแบ่งโซนพื้นที่รับลมดังแสดงในรูปที่ 23 และค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 23 (ก) แบบจำลองหลังคาโค้งมีค่า r เหลือ = ระยะยกหลังคา (rise) ต่อช่วงหลังคา (L) และความชันบริเวณชายคา (ข) การแบ่งโซนพื้นที่รับลมของหลังคาโค้ง

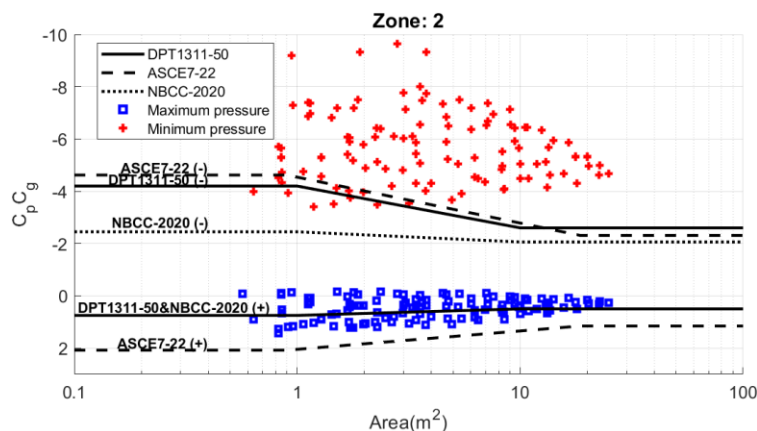
ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับหลังคารูปทรงโค้งตาม ASCE 7-22 [5] และที่แปลงค่าสัมประสิทธิ์เทียบเท่าตาม มยผ.1311-50 [7]

เงื่อนไข	อัตราส่วน $r = \text{rise} / L$	ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม GC_p (แปลงเป็น $C_g C_p$ เทียบเท่าตาม มยผ. 1311-50 [7])	
		Zone A	Zone B
หลังคาทรงโค้งบนโครงสร้างที่ยกระดับ	$0 < r < 0.2$	-1.08 (-2.50)	$-0.84-1.2r$ $(-1.94-2.77r)$
		$1.8r-0.36$ $(4.16r-0.83)$	
	$0.2 \leq r < 0.3$	$7.2r-2.52$ $(16.63r-5.82)$	$-0.84-1.2r$ $(-1.94-2.77r)$
		-0.6 (-1.39)	
	$0.3 \leq r \leq 0.6$	$3.3r-0.84$ $(7.62r-1.94)$	$-0.84-1.2r$ $(-1.94-2.77r)$
		-0.6 (-1.39)	
หลังคาโค้งวางบนพื้นดิน	$0 < r \leq 0.6$	$1.68r$ $(3.88r)$	$-0.84-1.2r$ $(-1.94-2.77r)$
		-0.6 (-1.39)	

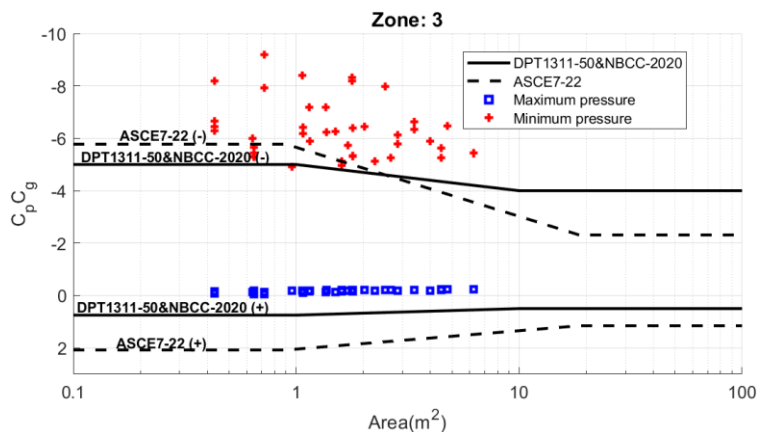
แบบจำลองหลังคาโค้งที่ศึกษามีค่า r เฉลี่ย เท่ากับ 0.16 ซึ่งอยู่ในช่วง $0 < r < 0.2$ ตามการจัดประเภทของ ASCE 7-22 [5] สำหรับหลังคาโค้งต่ำ (low-rise curved roof) โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมในโซนพื้นที่ขอบหลังคา 1, 2 และ 3 อ้างอิงแนวทางเดียวกับหลังคาทรงจั่ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความชันบริเวณชายคา ซึ่งในกรณีศึกษานี้มีความชันเท่ากับ 33° จัดอยู่ในช่วง $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ตามเกณฑ์ของมาตรฐาน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพื้นที่รับลมขอบด้านข้าง (2) และมุมบน (3) ดังรูปที่ 24 และ 25 ให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าแรงลมสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงมุมลม -60° ถึง -45° ซึ่งเป็นกรณีลมเฉียงด้านท้ายลม

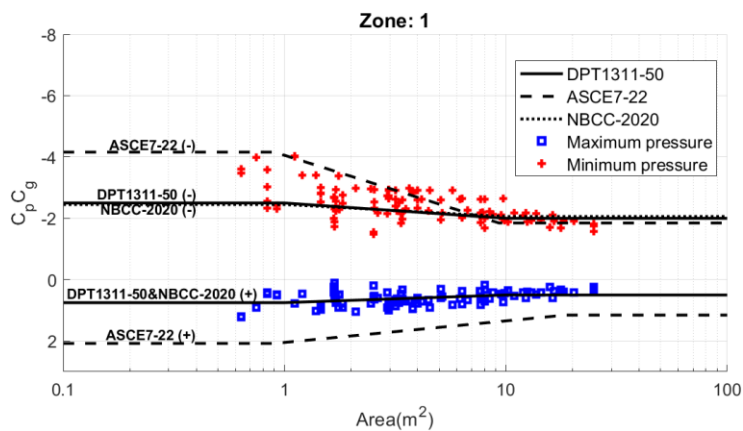
การไหลสามมิติบริเวณขอบหลังคาโค้ง ก่อให้เกิดการแยกตัวของกระแสลมและการรวมตัวของกระแสวน (vortex interaction) อย่างต่อเนื่องตามแนวผิวโค้ง แตกต่างจากหลังคาทรงจั่วที่มีจุดเปลี่ยนมุมชัดเจน เกิดบริเวณความดันลบที่รุนแรงและกระจายตัวมากกว่าในโซนขอบ ในทางกลับกัน ผลการศึกษาพบว่า โซนพื้นที่ 1 ดังรูปที่ 26 ให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดใน ASCE 7-22 [5] แสดงให้เห็นว่าการใช้แนวทางของมาตรฐานสำหรับพื้นที่ขอบล่างดังกล่าวมีความเหมาะสม



รูปที่ 24 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านข้าง (2) สำหรับหลังคารูปทรงโค้งความชันเทียบเท่า 18°

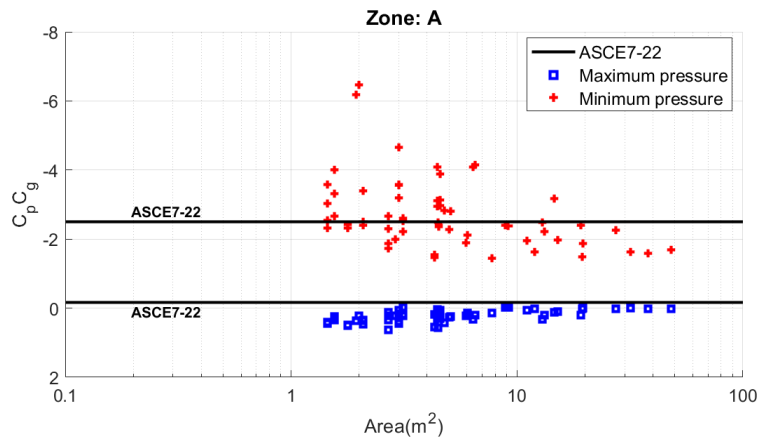


รูปที่ 25 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่มุมบน (3) สำหรับหลังคารูปทรงโค้ง ความชันเทียบเท่า 18°

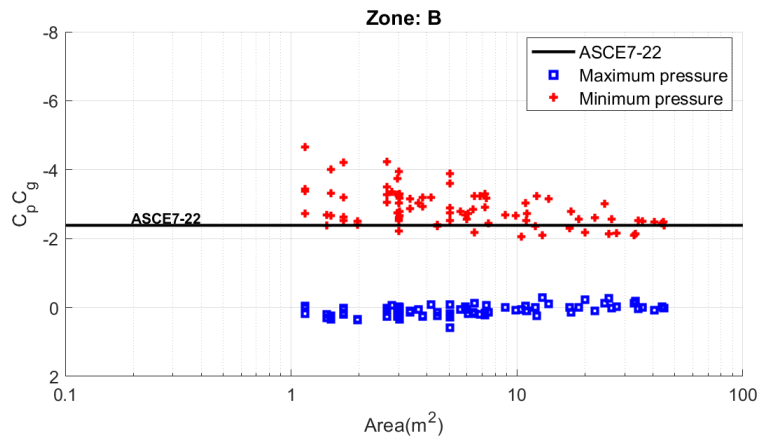


รูปที่ 26 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านล่าง (1) สำหรับหลังคารูปทรงโค้ง ความชันเทียบเท่า 18°

สำหรับพื้นที่กลางหลังคา มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] กำหนดให้พื้นที่ B มีค่าเป็นแรงดูดตลอดทั้งพื้นที่ ขณะที่พื้นที่ A อาจเกิดได้ทั้งแรงดูดและแรงดัน ผลการทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันในทั้งสองพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงศูนย์ สะท้อนว่าบริเวณกลางหลังคาไม่ได้เกิดบริเวณสะสมแรงดันอย่างเด่นชัด ในส่วนของแรงดูดพบว่าทั้งพื้นที่ A และ B ให้ค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานดังรูปที่ 27 และ 28 แสดงให้เห็นว่าแนวทางของ ASCE 7-22 [5] สามารถประเมินพฤติกรรมแรงลมบริเวณกลางหลังคาโค้งได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 27 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ A สำหรับหลังคารูปทรงโค้ง



รูปที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ B สำหรับหลังคารูปทรงโค้ง

5. สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยการคำนวณแรงลมของอาคารเตี้ยหลังคาทรงจั่วและโด่งโดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม พบว่า การประยุกต์ใช้แผนภาพไวโรนอยสามารถเพิ่มความสะดวกและแม่นยำในการคำนวณพื้นที่รับลม ผลการศึกษาสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

ผลการศึกษาพบว่า หลังคารูปทรงโค้งในกรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคา แสดงพฤติกรรมแรงลมที่แตกต่างจากหลังคารูปทรงจั่วอย่างชัดเจน โดยบริเวณด้านต้นลมเกิดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงกว่าด้านท้ายลม ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวทางในกฎกระทรวงที่กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงสุดสำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักเช่นเดียวกับหลังคารูปทรงจั่ว สะท้อนให้เห็นว่ารูปทรงโค้งมีลักษณะการไหลและการกระจายความดันที่แตกต่างในเชิงอากาศพลศาสตร์

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบโครงสร้างรองกับข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] ASCE 7-22 [5] และ NBCC 2020 [16] พบว่าแนวทางการแบ่งพื้นที่รับลมและการแบ่งช่วงความชันของ ASCE 7-22 [5] มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบมากที่สุด โดยเฉพาะในบริเวณมุมและขอบหลังคา ขณะที่ข้อกำหนดของ มยผ.1311-50 [7] มีแนวโน้มให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมต่ำเกินไปในบริเวณมุมและขอบของหลังคารูปทรงจั่ว และการแบ่งช่วงความชัน $7^\circ < \theta < 27^\circ$ ไม่สามารถสะท้อนความแตกต่างของพฤติกรรมแรงลมที่พบจากผลการทดสอบได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงสุดของทุกแบบจำลองเกิดขึ้นในช่วงมุมลมเฉียงประมาณ -60° ถึง -40° ซึ่งเป็นกรณีวิกฤตสำหรับการออกแบบ

จากผลงานวิจัยนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมกลไกการไหลของลมที่กระทำต่ออาคารเตี้ยทั้งหลังคาจั่วและโค้ง และเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักและโครงสร้างรองของอาคารเตี้ย และพบว่าควรพิจารณาปรับปรุงมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] ต่อไปในอนาคต เช่น ก) โดยเพิ่มกรณีการแบ่งช่วงความชันของหลังคาจั่วที่ละเอียดมากขึ้น เช่น เพิ่มแรงลมในช่วงความชัน 20° ถึง 27° ออกเป็นอีกกรณี และ ข) การเพิ่มแรงลมและการคำนวณแรงลมอาคารเตี้ยหลังคาโค้ง โดยอาจใช้แนวทางให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ASCE7-22 [5] สามารถเพิ่มระดับความปลอดภัยและความเหมาะสมในการออกแบบอาคารเตี้ยสำหรับประเทศไทย ภายใต้สภาวะลมที่มีแนวโน้มที่รุนแรงขึ้นจากผลของโลกร้อนขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ N25A671086 และผู้ประพันธ์อันดับแรกได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

References

- [1] Al-Chalabi R, Elshaer A. Aerodynamic mitigation of low-rise building with complex roof geometry. *Frontiers in Built Environment* 2023;9:1200383. doi: 10.3389/fbuil.2023.1200383.
- [2] Ho TCE, Surry D, Morrish D, Kopp GA. The UWO contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: part 1 archiving format and basic aerodynamic data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2005;93(1):1-30.
- [3] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-02. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2002.

- [4] Tamura Y. Aerodynamic database of low-rise buildings [Internet]. Tokyo: Tokyo Polytechnic University; 2012 [cited 2026 Jun 20]. Available from: http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/mainpage.html.
- [5] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-22. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2022.
- [6] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-16. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2016.
- [7] Department of Public Works and Town & Country Planning. DPT 1311-50. Standard for wind load calculation and building response. Bangkok: Department of Public Works and Town & Country Planning; 2007. (In Thai).
- [8] Zhang Q, Peng M, Yao J, Zhou Y, Huang J. Numerical simulation study on continuous span variable cross-section arched roof. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2025;63(2):331-48. doi: 10.15632/jtam-pl/200390.
- [9] Wood G, Lynar A. Codification of wind loads on curved-roofed structures. Proceedings of the 19th Australasian Wind Engineering Workshop; 2018 Apr 4-6; Torquay, Victoria, Australia.
- [10] Gierson ML, Phillips BM, Duthinh D, Ayyub BM. Wind-pressure coefficients on low-rise building enclosures using modern wind-tunnel data and Voronoi diagrams. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering 2017;3(4):04017010. doi: 10.1061/AJRUA6.0000915.
- [11] Uematsu Y, Yamamura R. Wind loads for designing the main wind-force resisting systems of cylindrical free-standing canopy roofs. Technical Transactions 2019;116(7):125-36. doi: 10.4467/2353737XCT.19.076.10727.
- [12] Natalini MB, Morel C, Natalini B. Mean loads on vaulted canopy roofs. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2013;119:102-13.
- [13] Macdonald PA, Kwok KC, Holmes JD. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. point pressure measurements on isolated structures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1988;31(2-3):165-87.
- [14] Delaunay B. On the empty sphere. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR 1934;7(6):793–800.

- [15] Duthinh D, Main JA, Phillips BM. NIST technical note 1903. Methodology to analyze wind pressure data on components and cladding of low-rise buildings. Gaithersburg (MD): National Institute of Standards and Technology; 2015.
- [16] Canadian Commission on Building and Fire Codes, National Research Council Canada. NBCC-2020. National Building Code of Canada 2020. Ottawa: National Research Council Canada; 2020.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นาย นรวิชญ์ มั่นศิลป์ นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ Email: norawish.mans@dome.tu.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: ผลของแรงลมต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว อุโมงค์ลม



ดร.จิรวัดน์ จันทรเรือง อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกจาก มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ Email: jirawat_ju@rmutto.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: ผลของแรงลมต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว อุโมงค์ลม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ศ.ดร.วิโรจน์ บุญญภักญ์ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกจาก Yokohama National University Email: bvrote@engr.tu.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: ผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหวต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และโครงสร้างเหล็ก

Article History:

Received: March 7, 2026

Revised: July 16, 2026

Accepted: July 20, 2026