มยผ. 1311-50

มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร

กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย
พ.ศ. 2550

มยผ. 1311-50

กรมโยธาธิการและผังเมือง ถ.พระราม 6
แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
โทร. 0-2299-4351 โทรสาร 0-2299-4366

มยผ. 1311 - 50

มาตรฐานการคำนวณแรงลม และการตอบสนองของอาคาร

กรมโยธาธิการและผังเมือง

กระทรวงมหาดไทย

พ.ศ. 2550

กรมโยธาธิการและผังเมือง

มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร / กรมโยธาธิการและผังเมือง

1. มาตรฐานการคำนวณแรงลม

ISBN 978 –974-458-165-5

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ.2537

โดย สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

กรมโยธาธิการและผังเมือง

ถ.พระราม 6 แขวงสามเสนใน

เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400

โทร. 0-2299-4351 โทรสาร 0-2299-4366

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2550 จำนวน 2,100 เล่ม

พิมพ์ที่ บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด

โทร. 0-2321-9757 โทรสาร 0-2722-9433

คำนำ

ในช่วงระยะเวลาสองถึงสามปีที่ผ่านมาจะเห็นว่าภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในประเทศไทยได้ทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นตามสภาพบรรยากาศของโลกที่แปรปรวนจากวิกฤตสภาวะโลกร้อน ภัยธรรมชาติดังกล่าวได้ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของอาคารและสิ่งก่อสร้างต่างๆ มาโดยตลอด แรงกระทำเนื่องจากลมถือได้ว่าเป็นแรงที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติและสภาพแวดล้อมประเภทหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงแข็งแรงของอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมืองได้รับรายงานความเสียหายของอาคาร รวมทั้งการวิบัติของโครงสร้างป้ายโฆษณาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของแรงลมถี่มากขึ้น โดยเฉพาะจากเหตุการณ์พายุฤดูร้อนที่มีฝนฟ้าคะนองและลมกระโชกแรงติดตามมา ที่สร้างความเสียหายแก่บ้านเรือนและสิ่งก่อสร้างในหลายพื้นที่ของประเทศอย่างต่อเนื่อง

กฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ข้อ 17 ได้กำหนดค่าหน่วยแรงลมในลักษณะของแรงดันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของอาคารไว้ โดยข้อบังคับดังกล่าวมีผลบังคับใช้ตั้งแต่ พ.ศ. 2527 แต่ยังไม่เคยได้รับการแก้ไขปรับปรุง ประกอบกับปัจจุบันได้มีการพัฒนาด้านข้อมูลลมและมาตรฐานการคำนวณแรงลมกันอย่างกว้างขวางและชัดเจนยิ่งขึ้น ส่งผลให้การออกแบบโครงสร้างอาคารภายใต้แรงลมตามข้อกำหนดที่มีอยู่ในปัจจุบันอาจไม่เหมาะสมทางปฏิบัติหรือความปลอดภัยยังไม่เป็นไปตามหลักมาตรฐานสากล กรมโยธาธิการและผังเมืองได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวจึงได้ดำเนินการโดยให้สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์เป็นที่ปรึกษา เพื่อปรับปรุงข้อกำหนดตลอดจนจัดทำมาตรฐานเกี่ยวกับการคำนวณหน่วยแรงลมที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของอาคารให้มีความเหมาะสมกับการออกแบบอาคารทุกประเภทและทุกภูมิภาคของประเทศ และมีระดับเทียบเท่าสากล ซึ่งในการดำเนินการจัดทำข้อกำหนดดังกล่าวจะทำให้สอดรับกับประมวลข้อบังคับอาคาร (Building Code) แห่งชาติที่กรมโยธาธิการและผังเมืองกำลังดำเนินการจัดทำอยู่ ซึ่งประมวลข้อบังคับอาคารดังกล่าวจะมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมอาคารในอนาคตอันใกล้นี้อีกด้วย

ท้ายนี้ กรมโยธาธิการและผังเมืองขอขอบคุณ ผู้เชี่ยวชาญด้านแรงลมจากสถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่เป็นกำลังสำคัญในการจัดทำมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร หรือ มยผ. 1311-50 ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยอย่างดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่ามาตรฐานดังกล่าวจะมีส่วนช่วยให้การออกแบบโครงสร้างอาคารต้านทานแรงลมมีประสิทธิภาพมากขึ้น อันจะทำให้การก่อสร้างอาคารทุกประเภทในทุกภูมิภาคของประเทศไทยมีความมั่นคงแข็งแรงเป็นไปตามมาตรฐานสากล ซึ่งจะก่อให้เกิดต่อความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนยิ่งขึ้นสืบไป

(นายฐิระวัตร กุลละวณิชย์)
อธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง

บทนำ

กฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ข้อ 17 ในหมวดแรงลม ได้กำหนดค่าหน่วยแรงลมที่กระทำกับอาคารเปลี่ยนแปลงตามความสูงของอาคารแต่เพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยอื่น เช่น ตำแหน่งที่ตั้งของอาคารว่าอยู่ในเขตที่มีความเร็วลมอ้างอิงและลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกัน เป็นต้น ดังนั้นกรมโยธาธิการและผังเมือง จึงได้ดำเนินการให้สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์เป็นที่ปรึกษาจัดทำมาตรฐานว่าด้วยการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคารสำหรับประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงลมภายในประเทศไทยให้ทันสมัยและมีความถูกต้องสมบูรณ์ทัดเทียมกับมาตรฐานสากล ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการทำให้มาตรฐานวิชาชีพเป็นที่ยอมรับในประชาคมวิชาชีพระหว่างประเทศในยุคโลกาภิวัฒน์ มาตรฐานฉบับใหม่นี้ได้คำนึงถึง ความเร็วลมอ้างอิงในเขตต่างๆ ลักษณะภูมิประเทศ รูปร่างของอาคาร และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร ซึ่งเป็นรูปแบบของมาตรฐานการคำนวณแรงลมที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล

เพื่อให้การจัดทำมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคารให้ทันสมัยและมีความถูกต้องสมบูรณ์ทัดเทียมกับมาตรฐานสากล ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยอย่างละเอียด โดยได้แบ่งเป็นงานวิจัยย่อย 8 เรื่อง ดังนี้ งานวิจัยย่อยที่ 1 เรื่อง แผนที่ความเร็วลมพื้นฐานสำหรับการออกแบบอาคารของประเทศไทย งานวิจัยย่อยที่ 2 เรื่อง การเปรียบเทียบแรงลมและการตอบสนองตามมาตรฐานของต่างประเทศที่เป็นสากล งานวิจัยย่อยที่ 3 เรื่อง การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม โดยวิธีวัดความดันลม งานวิจัยย่อยที่ 4 เรื่อง การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมเพื่อวัดแรงและคำนวณผลการตอบสนอง โดยวิธี High Frequency Force Balance งานวิจัยย่อยที่ 5 เรื่อง การวิเคราะห์และจำลองผลกระทบของลมที่มีต่ออาคาร โดยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) งานวิจัยย่อยที่ 6 เรื่อง มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร งานวิจัยย่อยที่ 7 เรื่อง คู่มือปฏิบัติประกอบมาตรฐานการคำนวณหน่วยแรงลมและการตอบสนองของอาคาร งานวิจัยย่อยที่ 8 เรื่อง การเปรียบเทียบผลกระทบในด้านราคาค่าก่อสร้างระหว่างการออกแบบโดยใช้ข้อกำหนดในกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) และร่างมาตรฐานฉบับใหม่

คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ข้อบังคับการออกแบบอาคารของประเทศแคนาดา ปี ค.ศ. 2005 (National Building Code of Canada (NBCC)) และมาตรฐานการคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบอาคาร ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ฯ ปี พ.ศ.2546 (E.I.T. Standard 1018-46) ประกอบในการร่าง ได้ประยุกต์บางส่วนของข้อแนะนำน้ำหนักบรรทุกสำหรับอาคารของประเทศญี่ปุ่น ปี ค.ศ. 2004 (Recommendation for Loads on Building, AIJ) สำหรับการคำนวณแรงลมและการตอบสนองในทิศตั้ง

ฉากกับทิศทางลม ได้ประยุกต์บางส่วนของมาตรฐานน้ำหนักบรรทุกออกแบบต่ำสุดสำหรับอาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ของประเทศสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 2005 (Minimum Design Loads for Building and Other Structures, ASCE7-05) สำหรับเป็นแนวทางในการจัดทำตารางค่าหน่วยแรงลมออกแบบสำหรับอาคารเตี้ยเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ได้ใช้สภาพลมในประเทศไทยในการทำแผนที่ความเร็วลมอ้างอิง ได้ใช้ผลการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมของประเทศไทยเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ความเหมาะสม และการนำไปประยุกต์ใช้งาน และได้ใช้ผลการตรวจวัดอาคารในประเทศไทยจำนวนมากเพื่อหาความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของอาคาร

มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคารแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนที่ 1. มาตรฐานการคำนวณแรงลมจำนวน 5 บท และ 3 ภาคผนวก ส่วนที่ 2. คำอธิบายมาตรฐาน และส่วนที่ 3. ตัวอย่างการคำนวณแรงลมและการตอบสนองจำนวน 6 ตัวอย่าง

ในฐานะหัวหน้าโครงการวิจัยจัดทำมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคารผมใคร่ขอขอบคุณคณะผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ช่วยกันดำเนินงานให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบคุณคณะกรรมการกำกับดูแลการปฏิบัติงานของที่ปรึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะ นายสุรพล พงษ์ไทยพัฒน์ (วิศวกรใหญ่) นายสุรชัย พรภัทรกุล (ผู้อำนวยการสำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร) และ ดร.เสถียร เจริญเหรียญ (วิศวกรวิชาชีพ 8) ของสำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานให้ดียิ่งขึ้น ท้ายสุดผมขอขอบคุณ นักศึกษาของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่มีส่วนสำคัญในการช่วยทำงานวิจัยย่อย 8 เรื่อง และมาตรฐานฉบับนี้ ได้แก่ นายวรพจน์ ธรรมสังคีติ นายกำธร เจนศุภเสรี นายพิเชษฐ์ กล้าหาญ นายธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล นายจีระสิทธิ์ ทิมสถิตย์ นายณัฐพล มากเทพพงษ์ นายอลงกรณ์ กฤตรัชตนันต์ และนายศราวุฒิ เหล่าพิพัฒน์ตระกูล รวมทั้งนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้แก่ นายบัญชา คำวอน และ นายเอกชัย วิเชียรสุวรรณ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ บุญญภิญโญ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
หัวหน้าโครงการวิจัย

คณะผู้วิจัย เรื่อง มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร

- **หัวหน้าโครงการวิจัย**

  รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ
  มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

- **ที่ปรึกษาโครงการวิจัย**

  ศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์
  จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **คณะผู้วิจัย**

  ศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ชูชีพสกุล
  มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

  รองศาสตราจารย์ ดร. เป็นหนึ่ง วานิชชัย
  สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

  รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม
  มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

  ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ ลิมสัมพันธ์เจริญ
  มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

  ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกิตย์ เทพมังกร
  Hong Kong University of Science and Technology

  ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์
  มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

คณะกรรมการกำกับดูแลการปฏิบัติงานของที่ปรึกษา
เรื่อง มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร

- **ประธานกรรมการ**

  วิศวกรใหญ่ สุรพล พงษ์ไทยพัฒน์

  กรมโยธาธิการและผังเมือง

- **คณะกรรมการ**

  นายสุรชัย พรภัทรกุล

  กรมโยธาธิการและผังเมือง

  นายสินิทธิ์ บุญสิทธิ์

  กรมโยธาธิการและผังเมือง

  ดร.เสถียร เจริญเหรียญ

  กรมโยธาธิการและผังเมือง

  นายไพฑูรย์ นนทศุข

  กรมโยธาธิการและผังเมือง

  นายวิบูลย์ ลีพัฒนากิจ

  กรมโยธาธิการและผังเมือง

- **กรรมการและเลขานุการ**

  นายพรชัย สังข์ศรี

  กรมโยธาธิการและผังเมือง

สารบัญ

หน้า

คำนำ (1)

บทนำ (3)

ส่วนที่ 1 มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร 1

บทที่ 1. ทั่วไป 2

1.1 ขอบข่าย 2

1.2 วิธีการกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่า 2

1.3 ข้อพิจารณาหลักของการออกแบบ 3

1.4 วิธีการคำนวณแรงลมร่วมกับน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ 3

1.5 นิยามศัพท์ 3

1.6 สัญลักษณ์ 4

บทที่ 2. การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าโดยวิธีการอย่างง่าย 8

2.1 การกำหนดค่าแรงลมโดยวิธีการอย่างง่าย 8

2.2 แรงลมออกแบบ 8

2.3 หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม 11

2.4 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ 12

2.5 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม 15

2.6 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม 17

2.7 แรงลมออกแบบสำหรับโครงสร้างหลัก และโครงสร้างรองของอาคารเตี้ย ในรูปแบบใช้ตาราง 18

2.8 การรวมผลของแรงลมเนื่องจากแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิด 18

บทที่ 3. การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าและการตอบสนองในทิศทางลมโดยวิธีการอย่างละเอียด 21

3.1 การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าโดยวิธีการอย่างละเอียด 21

3.2 แรงลมออกแบบ 21

3.3 หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม 21
3.4 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ 22
3.5 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม 23
3.6 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม 31
3.7 การโก่งตัวด้านข้าง 31
3.8 การสั่นไหวของอาคาร 32

บทที่ 4. การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าและการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า 34
4.1 การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม การตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า 34
4.2 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม 34
4.3 การสั่นไหวของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม 37
4.4 โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า 41
4.5 การรวมผลของแรงลมเนื่องจากแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า 43

บทที่ 5. การทดสอบในอุโมงค์ลม 48
5.1 ขอบข่ายการใช้งาน 48
5.2 การทดสอบ 48
5.3 การตอบสนองพลศาสตร์ 49

ภาคผนวก ก แผนที่ความเร็วลมอ้างอิง 50

ภาคผนวก ข แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม 54
ข.1 สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกสำหรับอาคารเตี้ย 54
ข.2 สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกสำหรับอาคารสูง 73
ข.3 สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับโครงสร้างพิเศษ 75

ภาคผนวก ค แรงลมออกแบบสำหรับอาคารเตี้ย 90
ค.1 แรงลมออกแบบสำหรับโครงสร้างหลักของอาคารเตี้ย 90
ค.2 แรงลมออกแบบสำหรับโครงสร้างรองของอาคารเตี้ย 101

ส่วนที่ 2 คำอธิบายมาตรฐาน 109

คำอธิบาย บทที่ 1.ทั่วไป 110
1.3 ข้อพิจารณาหลักของการออกแบบ 110
1.4 วิธีการคำนวณแรงลมร่วมกับน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ 110

คำอธิบาย บทที่ 2. การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าโดยวิธีการอย่างง่าย 112
2.2 แรงลมออกแบบ 112
2.3 หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม 112
2.4 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ 118
2.6 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม 124

คำอธิบาย บทที่ 3.การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าและการตอบสนองในทิศทางลม
โดยวิธีการอย่างละเอียด 128
3.5 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม 128

คำอธิบาย บทที่ 4. การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าและการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับ
ทิศทางลมและโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า 134
4.1 การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าและผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม
และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าการคำนวณแรงลมในทิศทางลม 134
4.2 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม 135
4.4 การคำนวณโมเมนต์บิด 136
4.5 การรวมผลของแรงลมเนื่องจากแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับ
ทิศทางลมและโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า 136
คำอธิบาย บทที่ 5. การทดสอบในอุโมงค์ลม 138
5.1 ขอบข่ายการใช้งาน 138
5.2 การทดสอบ 138

บรรณานุกรม 145

ส่วนที่ 3 ตัวอย่างการคำนวณแรงลมและการตอบสนอง 149

ตัวอย่างการคำนวณของอาคารเตี้ยโดยวิธีการอย่างง่าย

ตัวอย่างที่ 1. การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับโครงสร้างหลักและโครงสร้างรอง ของอาคารเตี้ย 150

ตัวอย่างการคำนวณของอาคารสูงปานกลางโดยวิธีการอย่างง่าย

ตัวอย่างที่ 2. การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับโครงสร้างหลักของอาคาร สูงปานกลาง 164

ตัวอย่างการคำนวณของอาคารสูง

ตัวอย่างที่ 3. การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับโครงสร้างหลักในทิศทางลม ตั้งฉากกับทิศทางลม และการบิด และการตอบสนองของอาคารสูง 170

ตัวอย่างที่ 4. การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับผนังภายนอกอาคารและหลังคา ของอาคารสูงปานกลาง 192

ตัวอย่างการคำนวณของโครงสร้างพิเศษ

ตัวอย่างที่ 5. การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับป้ายขนาดใหญ่ 201

ตัวอย่างที่ 6. การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับปล่องควัน 204

ส่วนที่ 1

มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร

บทที่ 1
ทั่วไป

1.1 ขอบข่าย

(ก) มาตรฐานนี้ได้กำหนดวิธีการคำนวณค่าของแรงลมและผลกระทบในรูปแบบต่างๆ ของลมที่มีต่ออาคาร เพื่อใช้ในการออกแบบระบบโครงสร้างหลักของอาคาร องค์อาคาร และส่วนประกอบอื่นๆ ของอาคาร เช่น ผนังภายนอกอาคาร หลังคา เป็นต้น

(ข) ข้อกำหนดต่างๆ ในมาตรฐานนี้ เป็นข้อกำหนดในขั้นต่ำสุดที่จำเป็นต่อการออกแบบอาคาร เพื่อให้อาคารมีความปลอดภัย และเพื่อจำกัดผลกระทบในรูปแบบต่างๆ ของลมที่มีต่ออาคารให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ตามเกณฑ์มาตรฐานสากล

(ค) มาตรฐานการคำนวณ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบอาคารทั่วไป ตั้งแต่ อาคารเตี้ยจนถึงอาคารสูงที่มีรูปทรงปกติ แต่มาตรฐานไม่ครอบคลุมถึงการออกแบบอาคารที่มีลักษณะพิเศษ หรือโครงสร้างอื่นๆ ที่อาจมีการตอบสนองต่อแรงลมรุนแรงกว่าปกติ เช่น ปล่องควันที่มีความสูงชะลูด สะพานช่วงยาว ฯลฯ ซึ่งต้องใช้การทดสอบในอุโมงค์ลม

(ง) มาตรฐานการคำนวณ ไม่ได้ครอบคลุมสภาพภูมิประเทศที่มีลักษณะพิเศษ ที่อาจทำให้เกิดแรงลมที่สูงกว่าปกติ เช่น ช่องลมเฉพาะที่ (local channel) ผลของอาคารข้างเคียง ฯลฯ ซึ่งต้องใช้การทดสอบในอุโมงค์ลม

(จ) มาตรฐานนี้ใช้หน่วย SI (international system units)

1.2 วิธีการกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่า

วิธีกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่า มี 3 วิธี คือ

(ก) การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างง่าย ตามที่กำหนดในบทที่ 2

(ข) การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม โดยวิธีการอย่างละเอียด ตามที่กำหนดในบทที่ 3 และการคำนวณหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า ตามที่กำหนดในบทที่ 4

(ค) การทดสอบในอุโมงค์ลม ตามที่กำหนดในบทที่ 5

1.3 ข้อพิจารณาหลักของการออกแบบ

ในการออกแบบอาคาร จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากแรงลมในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

(ก) ระบบโครงสร้างหลักของอาคาร องค์อาคาร และส่วนประกอบอื่นของอาคาร ต้องได้รับการออกแบบให้มีกำลัง (strength) และเสถียรภาพ (stability) ที่สูงเพียงพอที่จะสามารถต้านทานแรงลมหรือผลกระทบเนื่องจากลมได้อย่างปลอดภัยโดยไม่เกิดความเสียหายใดๆ ตามที่กำหนดในบทที่ 2, 3 และ 4

(ข) การโก่งตัวด้านข้าง (lateral deflection) ของอาคารเนื่องจากแรงลมจะต้องมีค่าน้อยเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่องค์อาคารหลักและองค์อาคารรอง ตามที่กำหนดในบทที่ 3

(ค) การสั่นไหวของอาคาร (building motion) ที่เกิดจากลม ทั้งในทิศทางลม และทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ต้องมีระดับที่ต่ำเพียงพอที่จะไม่ทำให้ผู้ใช้อาคารรู้สึกไม่สบายหรือเกิดอาการวิงเวียน ตามที่กำหนดในบทที่ 3 และ 4

1.4 วิธีคำนวณแรงลมร่วมกับน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ

การคำนวณแรงลมร่วมกับน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ ให้เป็นไปตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

1.5 นิยามศัพท์

"ความสูงเฉลี่ยของหลังคา" หมายถึง ความสูงที่วัดจากจุดกึ่งกลาง (mid-height) ของหลังคา กล่าวคือ ความสูงเฉลี่ยระหว่างความสูงเฉลี่ยของยอดหลังคา และความสูงของชายคา ในกรณีความชันของหลังคาน้อยกว่า 7-10 องศา สามารถใช้ความสูงของชายคาแทนได้

"ชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members)" หมายถึง ชิ้นส่วนของโครงสร้างรองที่ใช้รับกำลัง และส่งถ่ายแรงไปยังระบบโครงสร้างหลัก ตัวอย่างเช่น โครงเคร่า (girt) แป (purlin) เป็นต้น

"ผนังภายนอก (cladding)" หมายถึง ผนังภายนอกอาคารที่ห่อหุ้มอาคาร

"ระบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม (main wind-force resistant system)" หมายถึง ระบบโครงสร้างหลัก ที่ใช้รับกำลังและเสถียรภาพของโครงสร้างภายใต้แรงลม ซึ่งประกอบด้วย

เสา คาน หรือผนังรับแรงเฉือน เป็นต้น ระบบโครงสร้างหลักโดยทั่วไป จะรับแรงลมมากกว่าหนึ่งพื้นผิว

"สภาวะจำกัดด้านกำลัง (ultimate limit state)" หมายถึง ความสามารถของโครงสร้าง หรือองค์อาคารในการต้านทานกำลังสูงสุดภายใต้ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุก

"สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน (serviceability limit state)" หมายถึง ความสามารถของโครงสร้างหรือองค์อาคารในการใช้งานได้ดี และก่อให้เกิดความสะดวกสบายของผู้ใช้งาน เช่น การโก่งตัว และการสั่นไหว เป็นต้น

"อาคารเตี้ย (low-rise building)" หมายถึง อาคารที่มีความสูงเฉลี่ยของหลังคาไม่เกิน 23 เมตร หรืออาคารที่แข็งเกร็ง (rigid) มาก

"อาคารรูปทรงปกติ" หมายถึง อาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือคล้ายสี่เหลี่ยม และมีรูปทรงสม่ำเสมอเป็นส่วนใหญ่

"อาคารสูง (high-rise building)" หมายถึง อาคารที่มีความสูงเฉลี่ยของหลังคามากกว่า 23 เมตรขึ้นไป

1.6 สัญลักษณ์

a = สัมประสิทธิ์ตัวลดความเร็วลมตามความสูง

a_D = อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศทางลม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที^{2}

a_w = อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคาร ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที^{2}

A = พื้นที่รับลม มีค่าเท่ากับผลคูณของความกว้างของอาคาร (W) กับมิติในแนวดิ่งของพื้นที่ที่พิจารณาแรง (h) มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

A_0 = พื้นที่รวมทั้งหมดของช่องเปิดบนผนังภายนอกอาคาร มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

B = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกึ่งสถิตต่อการแปรปรวนของลม (background turbulence factor)

C_e = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (exposure factor)

C_{eH} = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่ระดับความสูงของยอดอาคาร

C_e^* = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศลาดชัน

C_g = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (gust effect factor)

C_{gi} = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม ที่กระทำกับพื้นผิวภายในอาคาร

C_g^* = ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่ปรับแก้ผลการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน

$C_L^{'}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำ โดยเป็นค่ารากกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์พลิกคว่ำในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม (root-mean-square of overturning moment coefficient in across-wind direction)

C_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (external pressure coefficient)

C_p^* = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉพาะที่

C_{pi} = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร (internal pressure coefficient)

$C_T^{'}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์บิด โดยเป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด (root-mean-square of torsional moment coefficient)

D = มิติในแนวราบของอาคารในแนวขนานกับทิศทางลม มีหน่วยเป็นเมตร

D_s = ความกว้างของด้านที่แคบที่สุด มีหน่วยเป็นเมตร

e_X = ระยะเยื้องศูนย์ ในทิศทางแกนหลัก X ของอาคาร

e_Y = ระยะเยื้องศูนย์ ในทิศทางแกนหลัก Y ของอาคาร

F = อัตราส่วนพลังงานของการแปรปรวนของลม ณ ความถี่ธรรมชาติของอาคาร (gust energy ratio at the natural frequency of the structure)

F_L = ค่าสเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม

F_T = ค่าสเปกตรัมของแรงลมในแนวบิดของอาคาร

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

g_L = ค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

g_p = ค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในทิศทางลม

g_T = ค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในแนวบิด

H = ความสูงของอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร

H_h = ความสูงของเนินเขาและลาดชัน

I_w = ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม

K = ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ

L_h = ระยะทางในแนวราบด้านต้นลม จากยอดเนินเขาถึงระยะ $H_h / 2$

M_T = โมเมนต์บิดต่อความสูง 1 เมตร มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร

n_D = ค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางลม มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz)

n_W = ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz)

n_T = ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในแนวบิด มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz)

p = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า (equivalent static wind pressure) มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

p_i = หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายในอาคาร

P_L = แรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำบนพื้นผิวของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมที่ความสูง z จากพื้นดิน มีหน่วยเป็น นิวตัน

p_{LX} = หน่วยแรงลมด้านท้ายลม ในทิศทางแกนหลัก X ของอาคาร

p_{LY} = หน่วยแรงลมด้านท้ายลม ในทิศทางแกนหลัก Y ของอาคาร

p_{WX} = หน่วยแรงลมด้านต้นลม ในทิศทางแกนหลัก X ของอาคาร

p_{WY} = หน่วยแรงลมด้านต้นลม ในทิศทางแกนหลัก Y ของอาคาร

q = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (reference velocity pressure) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

q_H = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม ที่ระดับความสูงยอดอาคาร มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

R_L = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม

R_T = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลมในแนวบิดของอาคาร

s = ตัวคูณลดเนื่องจากขนาดของอาคาร (size reduction factor)

T_F = ค่าประกอบไต้ฝุ่น

V_0 = ปริมาตรภายในของอาคาร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร

V_{50} = ค่าความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 50 ปี

$\overline{V}$ = ความเร็วลมอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

V_H = ค่าความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง ที่ระดับความสูงของยอดอาคาร มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

W = ความกว้างประสิทธิผลของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม มีหน่วยเป็นเมตร

z = ความสูงจากพื้นดิน ณ ตำแหน่งที่คำนวณค่าหน่วยแรงลม มีหน่วยเป็นเมตร

α = ตัวยกกำลังของค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ

β_D = อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) ของการสั่นไหวของอาคารในทิศทางลม

β_W = อัตราส่วนความหน่วงของการสั่นไหวของอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

β_T = ค่าอัตราส่วนความหน่วงของการสั่นไหวของอาคารในแนวบิด

Δ = การโก่งตัวทางด้านข้างสูงสุดในทิศทางลม ณ ตำแหน่งยอดอาคาร

$\Delta S_{\max}$ = ค่าประกอบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดเนินเขาและลาดชัน

μ = ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของอาคารเนื่องจากแรงลม (mean loading effect)

ν = ค่าความถี่เฉลี่ยของการตอบสนองของโครงสร้าง (average fluctuation rate) มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที

ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศ (ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1.25 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร) สำหรับความดันบรรยากาศปกติและอุณหภูมิของอากาศประมาณ 15 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส

ρ_B = ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (average density of the building) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร

σ = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองด้านพลศาสตร์เนื่องจากความผันผวนของแรงลม (root-mean-square loading effect)

τ = ตัวแปรที่บอกระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการแปรเปลี่ยนของความดันภายนอกอาคาร

บทที่ 2
การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างง่าย

2.1 การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างง่าย

การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างง่าย ใช้กับโครงสร้างต่อไปนี้

ก. ระบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม (main wind-force resistant system) ของอาคารเตี้ยและอาคารสูงปานกลางที่มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร และมีความสูงไม่เกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิผลที่น้อยที่สุด ตามที่กำหนดในสมการ (2-1) ยกเว้นอาคารที่ระบุไว้ในหัวข้อ 3.1ข

ข. ผนังภายนอกอาคาร (cladding) ของอาคารทุกประเภท

ค่าความกว้างประสิทธิผลของอาคาร ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.1ก สามารถคำนวณได้จาก

$$W = \frac{\sum h_i W_i}{\sum h_i} \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่ Σ = ผลรวมของทุกชั้นของอาคาร

h_i = ความสูงจากพื้นดิน ถึงพื้นชั้นที่ i

W_i = ความกว้างของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ที่ความสูง h_i

ความกว้างประสิทธิผลที่น้อยที่สุดของอาคาร ให้พิจารณาจากทิศทางลมในทุกทิศทาง

2.2 แรงลมออกแบบ

2.2.1 หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายนอกของอาคารในทิศทางลม สามารถคำนวณได้จาก

$$p = I_w q C_e C_g C_p \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่ p = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า (equivalent static wind pressure) กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายนอกอาคาร โดยเรียกว่า “หน่วยแรงดัน” ถ้ามีทิศเข้าหาพื้นผิว หรือ “หน่วยแรงดูด” ถ้ามีทิศพุ่งออกจากพื้นผิว

I_w = ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.2.5

q = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (reference velocity pressure) ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.3

C_e = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (exposure factor) ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.4

C_g = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (gust effect factor) ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.5

C_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (external pressure coefficient) ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.6

2.2.2 แรงลมสุทธิที่กระทำต่ออาคารโดยรวม เป็นผลรวมแบบเวคเตอร์ของแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายนอกของอาคารทางด้านต้นลมและท้ายลม รวมถึงด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้อง โดยที่แรงลมนี้คือ ผลคูณของหน่วยแรงลมในหัวข้อ 2.2.1 กับพื้นที่ผิวของอาคาร

2.2.3 หน่วยแรงลมสุทธิเพื่อใช้ในการคำนวณแรงลมที่กระทำต่อส่วนใดส่วนหนึ่งของด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร (เช่น ผนังภายนอก หรือ หลังคา) เป็นผลรวมแบบเวคเตอร์ของหน่วยแรงลม ที่กระทำบนพื้นผิวภายนอก (ดังแสดงในหัวข้อ 2.2.1) กับหน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวที่กระทำบนพื้นผิวภายใน โดยที่หน่วยแรงลมภายในคำนวณจาก

$$p_i = I_w q C_e C_{gi} C_{pi} \qquad (2\text{-}3)$$

โดยที่ p_i = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า (equivalent static wind pressure) กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายในอาคาร โดยเรียกว่า “หน่วยแรงดัน” ถ้ามีทิศเข้าหาพื้นผิว หรือ “หน่วยแรงดูด” ถ้ามีทิศพุ่งออกจากพื้นผิว

C_{gi} = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลมที่กระทำภายในอาคาร ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.5

C_{pi} = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.6

2.2.4 ประเภทของอาคารตามความสำคัญต่อสาธารณชน แสดงในตารางที่ 2-1

2.2.5 ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม แสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 การจำแนกประเภทของอาคาร ตามความสำคัญต่อสาธารณชน

ประเภทของอาคาร	ประเภทความสำคัญ
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่มีปัจจัยเสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ค่อนข้างน้อยเมื่อเกิดการพังทลายของอาคารหรือส่วนโครงสร้างนั้นๆ เช่น - อาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร - อาคารชั่วคราว - อาคารเก็บของเล็กๆ ซึ่งไม่มีความสำคัญ	น้อย
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่ไม่จัดอยู่ในอาคารประเภท ความสำคัญ น้อย มาก และสูงมาก	ปกติ
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่หากเกิดการพังทลาย จะเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสาธารณชนอย่างมาก เช่น - อาคารที่เป็นที่ชุมนุมในพื้นที่หนึ่งๆ มากกว่า 300 คน - โรงเรียนประถมหรือมัธยมศึกษาที่มีความจุมากกว่า 250 คน - มหาวิทยาลัยหรือวิทยาลัย ที่มีความจุมากกว่า 500 คน - สถานรักษาพยาบาลที่มีความจุคนไข้มากกว่า 50 คน แต่ไม่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - เรือนจำและสถานกักกันนักโทษ	มาก
อาคารและส่วนโครงสร้างที่มีความจำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชนเป็นอย่างมาก หรืออาคารที่จำเป็นต่อการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุเป็นอย่างมาก เช่น - โรงพยาบาลที่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิง และโรงเก็บรถฉุกเฉินต่างๆ - โรงไฟฟ้า - โรงผลิตน้ำประปา ถังเก็บน้ำ และสถานีสูบจ่ายน้ำที่มีความดันสูงสำหรับการดับเพลิง - อาคารศูนย์สื่อสาร - อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย - ท่าอากาศยาน ศูนย์บังคับการบิน และโรงเก็บเครื่องบิน ที่ต้องใช้เมื่อเกิดกรณีฉุกเฉิน - อาคารศูนย์บัญชาการแห่งชาติ อาคารหรือส่วนโครงสร้างในส่วนของการผลิต การจัดการ การจัดเก็บ หรือการใช้สารพิษ เช่น เชื้อเพลิง หรือสารเคมี อันก่อให้เกิดการระเบิดขึ้นได้	สูงมาก

ตารางที่ 2-2 ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม

ประเภทความสำคัญของอาคาร	ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม	
	สภาวะจำกัดด้านกำลัง	สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน
น้อย	0.8	0.75
ปกติ	1	0.75
มาก	1.15	0.75
สูงมาก	1.15	0.75

2.3 หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q)

2.3.1 หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม สามารถคำนวณได้จาก

$$q = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^2 \qquad (2\text{-}4)$$

โดยที่ q ที่คำนวณได้ มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

(หรือ $$q = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{g}\right)\overline{V}^2$$

โดยที่ q ที่คำนวณได้ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (แรง) ต่อตารางเมตร)

ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศ (ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1.25 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร) สำหรับความดันบรรยากาศปกติและอุณหภูมิของอากาศประมาณ 15 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส

$\overline{V}$ = ความเร็วลมอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.3.2

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.806 ม./วินาที^{2}

2.3.2 ความเร็วลมอ้างอิง คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่ง (open exposure, ดูรายละเอียดหัวข้อ 2.4 และ 3.4) สำหรับคาบเวลากลับ (return period) 50 ปี (V_{50}) (ยกเว้น กลุ่มที่ 4A และ 4B ในรูปที่ ก.1) ความเร็วลมอ้างอิงของพื้นที่ต่างๆ ในประเทศไทย แสดงในรูปที่ ก.1 และตารางที่ ก-1

สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน $\overline{V} = V_{50}$

สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านกำลัง $\overline{V} = T_F V_{50}$

โดยที่ T_F = ค่าประกอบไต้ฝุ่น แสดงในภาคผนวก ก.

2.4 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ เป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมให้แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ

2.4.1 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ

การคำนวณค่าแรงลมโดยวิธีการอย่างง่าย คำนึงถึงสภาพภูมิประเทศเป็น 2 ประเภท ดังนี้

ก. สภาพภูมิประเทศแบบ A เป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่งซึ่งมีอาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้าง กระจัดกระจายอยู่ห่างๆ กัน หรือเป็นบริเวณชายฝั่งทะเล ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (2-5) หรือใช้ค่าจากตาราง 2-3

$$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} \qquad (2\text{-}5)$$

โดยที่ z = ความสูงจากพื้นดิน (หน่วยเป็นเมตร) ณ ตำแหน่งที่คำนวณค่าหน่วยแรงลม โดยที่ถ้า C_e ที่คำนวณจากสมการ (2-5) มีค่าน้อยกว่า 0.9 กำหนดให้ใช้ค่า $C_e = 0.9$

ข. สภาพภูมิประเทศแบบ B เป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือพื้นที่ที่มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดเล็ก ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (2-6) หรือใช้ค่าจากตาราง 2-3

$$C_e = 0.7\left(\frac{z}{12}\right)^{0.3} \qquad (2\text{-}6)$$

โดยที่ ถ้า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ (2-6) มีค่าน้อยกว่า 0.7 กำหนดให้ใช้ค่า $C_e = 0.7$

สภาพภูมิประเทศใดๆ จะจัดอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ B ได้ ก็ต่อเมื่อมีลักษณะภูมิประเทศในลักษณะนั้นๆ สม่ำเสมอในทิศทางต้นลม เป็นระยะทางไม่ต่ำกว่า 1

กิโลเมตร หรือ 10 เท่าของความสูงของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่า ซึ่งสภาพภูมิประเทศที่ใช้ในการคำนวณนี้ ควรสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศที่แท้จริงในทิศทางลมที่พิจารณา

ข้อยกเว้น อาคารที่มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร และตั้งอยู่ในกลุ่มที่มีความเร็วลมอ้างอิง ($\overline{V} = T_F V_{50}$) ไม่เกิน 25 ม./วินาที ในรูปที่ ก.1 ให้ใช้เฉพาะสภาพภูมิประเทศแบบ A เท่านั้น

ตารางที่ 2-3 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) สำหรับวิธีการอย่างง่าย

ความสูงจากพื้นดิน	สภาพภูมิประเทศแบบ A	สภาพภูมิประเทศแบบ B
สูงไม่เกิน 6 เมตร	0.90	0.70
สูงเกิน 6 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร	1.00	0.70
สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	1.15	0.82
สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 30 เมตร	1.25	0.92
สูงเกิน 30 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.32	1.00
สูงเกิน 40 เมตร แต่ไม่เกิน 60 เมตร	1.43	1.13
สูงเกิน 60 เมตร แต่ไม่เกิน 80 เมตร	1.52	1.24

2.4.2 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน

อาคารหรือโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณเนินเขาและลาดชัน ที่มีอัตราส่วนระยะทางแนวดิ่งต่อแนวราบมากกว่า 1 ต่อ 10 (5.7 องศา) มีผลทำให้ความเร็วลมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากกว่าลมที่พัดผ่านบริเวณแบบราบ ดังนั้น ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศลาดชัน (C_e^*) เท่ากับ ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศแบบราบ คูณกับค่าประกอบ $(1+\Delta S(z))^2$ โดยที่ $\Delta S(z)=$ ค่าประกอบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมเฉลี่ยบริเวณเนินเขาและลาดชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ค่าประกอบที่ปรับแก้เนื่องจากสภาพภูมิประเทศลาดชัน (C_e^*) ใช้แทนค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศแบบราบ และคำนวณภายในระยะทาง $|x| < kL_h$ ได้ดังนี้

$$C_e^* = C_e\left\{1+\Delta S_{\max}\left(1-\frac{|x|}{kL_h}\right)e^{(-az/L_h)}\right\}^2 \qquad (2\text{-}7)$$

โดยที่ C_e = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศบริเวณแบบราบ ในหัวข้อ 2.4.1 สำหรับวิธีการอย่างง่าย และในหัวข้อ 3.4 สำหรับวิธีการอย่างละเอียด

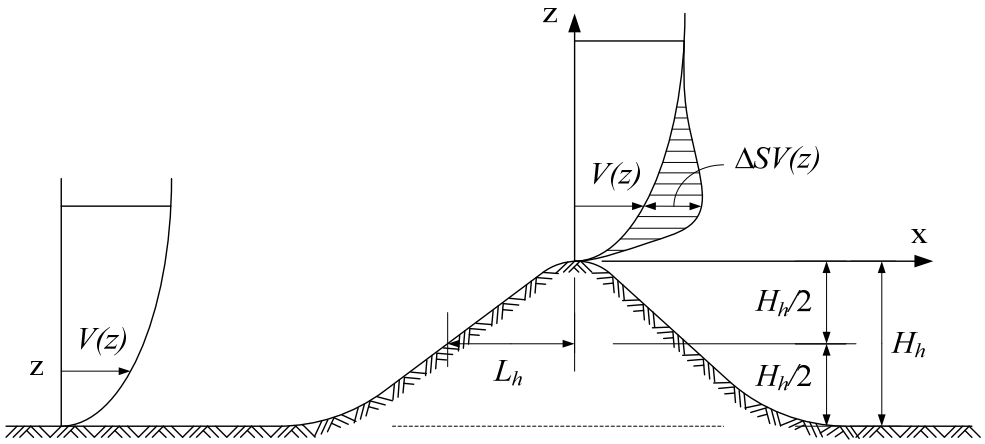
$\Delta S_{\max}$ = ค่าประกอบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดเนินเขาและลาดชัน

a = สัมประสิทธิ์ตัวลดความเร็วลมตามความสูง

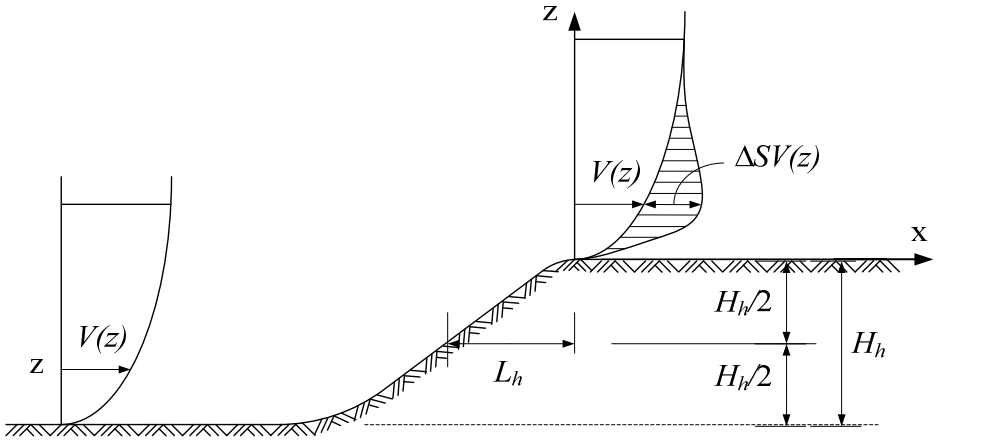
H_h = ความสูงของเนินเขา และลาดชัน

L_h = ระยะทางในแนวราบด้านต้นลมจากยอดเนินเขาถึงระยะ $H_h / 2$

ค่า $\Delta S_{\max}$ และ a ขึ้นกับรูปร่างและความชันของเนินเขา ดังแสดงในตารางที่ 2-4



(ก) บริเวณเนินเขา



(ข) บริเวณลาดชัน

รูปที่ 2.1 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน

ตารางที่ 2-4 ค่าประกอบสำหรับคำนวณการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน

รูปร่างเนินเขา	$\Delta S_{\max}$	a	k	
			$x<0$	$x>0$
เนินเขา 2 มิติ (หรือหุบเขาที่ค่า H_h เป็นลบ)	$2.2H_h/L_h$	3	1.5	1.5
ที่ราบสูง 2 มิติ	$1.3H_h/L_h$	2.5	1.5	4
เนินเขา 3 มิติ ไม่สมมาตร	$1.6H_h/L_h$	4	1.5	1.5

หมายเหตุ : สำหรับอัตราส่วน $H_h/L_h > 0.5$ กำหนดให้ใช้ $H_h/L_h = 0.5$ และแทนค่า $L_h = 2H_h$ เมื่อคำนวณ C_e^* ในสมการ (2-7)

2.5 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (C_g)

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม คือ อัตราส่วนระหว่างผลของแรงลมสูงสุดต่อผลของแรงลมเฉลี่ย ค่าประกอบ C_g สำหรับวิธีการอย่างง่าย คำนวณได้ดังนี้

2.5.1 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม ที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร

ก. สำหรับหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร ให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 2.0 ในการออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม ยกเว้น ป้ายและกำแพง ให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 2.35

ข. สำหรับหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร ให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 2.5 ในการออกแบบโครงสร้างรองและผนังภายนอกอาคาร (cladding) ที่มีขนาดเล็ก (ประมาณขนาดของหน้าต่าง)

2.5.2 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่กระทำภายในอาคาร

สำหรับหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายในอาคาร ให้ใช้ค่า C_{gi} เท่ากับ 2.0 หรือค่าที่คำนวณจากสมการ (2-8) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและปริมาณของช่องเปิด (opening) ของอาคาร ในกรณีที่อาคารมีขนาดใหญ่และไม่มีผนังกั้นภายในซึ่งทำให้ปริมาตรภายในของอาคารมีค่ามาก ค่าความดันลมภายในอาคารจะมีการแปรเปลี่ยนช้าเมื่อเทียบกับการแปรเปลี่ยนของความดันลมภายนอกอาคาร ซึ่งในกรณีดังกล่าว อาจใช้ค่าที่คำนวณตามสมการที่ (2-8)

$$C_{gi} = 1 + \frac{1}{\sqrt{1+\tau}} \qquad (2\text{-}8)$$

โดยที่ τ = ตัวแปรที่บอกระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการแปรเปลี่ยนของความดันภายนอกอาคาร ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-9)

$$\tau = \frac{V_0}{6{,}950 A_0} \qquad (2\text{-}9)$$

โดยที่ V_0 = ปริมาตรภายในของอาคาร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร (เมตร^3)

A_0 = พื้นที่รวมทั้งหมดของช่องเปิดบนผนังภายนอกอาคาร มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (เมตร^2)

2.5.3 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่ปรับแก้จากผลการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน

ก. เนื่องจากลมที่พัดผ่านบริเวณเนินเขาและลาดชันทำให้ความเร็วลมเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แต่ไม่ทำให้ขนาดของการแปรปรวนของความเร็วลมเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงต้องปรับแก้ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม ทั้งในวิธีการอย่างง่าย และวิธีการอย่างละเอียด ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่ปรับแก้จากผลการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน (C_g^*) ใช้แทนค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมในบริเวณแบบราบ และคำนวณได้ดังนี้

$$C_g^* = 1 + (C_g - 1)\sqrt{\frac{C_e}{C_e^*}} \qquad (2\text{-}10)$$

โดยที่ C_g = ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมในบริเวณแบบราบ ในหัวข้อ 2.5.1 และ 2.5.2 สำหรับวิธีการอย่างง่าย และในหัวข้อ 3.5 สำหรับวิธีการอย่างละเอียด

ข. การปรับแก้ผลคูณของ C_pC_g สำหรับอาคารเตี้ยที่ตั้งอยู่บริเวณเนินเขาและลาดชันทำได้โดย คูณค่า C_pC_g ด้วยอัตราส่วน C_g^*/C_g โดยที่ C_g คำนวณได้จากหัวข้อ 2.5.1 และ C_g^* จากสมการที่ (2-10)

2.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p)

2.6.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคาร ทิศทางลม และลักษณะการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมตามความสูงอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม ที่กระทำภายนอกอาคาร สำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารและระบบโครงสร้างหลักของอาคาร แบ่งออกเป็น 3 หมวด ดังนี้

ก. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก สำหรับอาคารเตี้ยที่มีความสูงต่อความกว้าง $\left(\frac{H}{D_s}\right)$ น้อยกว่า 1 (D_s คือความกว้างของด้านที่แคบที่สุด) และมีความสูงอ้างอิง (reference height) น้อยกว่า 23 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมได้ถูกนำมารวมกับค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม ดังแสดงในรูปที่ ข.1 ถึง ข. 8 ในภาคผนวก ข.1

ข. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก สำหรับอาคารสูง ดังแสดงในรูปที่ ข.9 ในภาคผนวก ข.2

ค. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก สำหรับโครงสร้างพิเศษ ดังแสดงในรูปที่ ข.10 ถึง ข.18 ในภาคผนวก ข.3

2.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายใน (C_{pi}) ใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงลมภายในอาคาร ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบผนังภายนอกอาคาร และระบบโครงสร้างหลักต้านแรงลม ค่าสัมประสิทธิ์ C_{pi} นี้ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวและขนาดของรอยรั่วซึมตลอดจนช่องเปิดบนผนังภายนอกอาคารและหลังคา ซึ่งในการออกแบบอาคารสามารถพิจารณาแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ตามหัวข้อดังต่อไปนี้ โดยกำหนดให้ใช้ได้ทั้งวิธีการอย่างง่ายและวิธีการอย่างละเอียด และทุกกรณีจะต้องคำนวณหาค่า C_{gi} ตามหัวข้อ 2.5 เพื่อใช้ร่วมในการหาค่าหน่วยแรงลมภายในอาคารด้วย

กรณีที่ 1 ใช้ค่า $C_{pi} = -0.15$ ถึง 0.0

กรณีนี้ใช้กับอาคารที่ปราศจากช่องเปิดขนาดใหญ่ แต่อาจมีช่องเปิดเล็กๆกระจายสม่ำเสมอ โดยมีพื้นที่ช่องเปิดรวมน้อยกว่า 0.1% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ตัวอย่างได้แก่ อาคารสูงทั่วๆไปที่มีผนังปิดล้อมทุกด้านและมีระบบระบายอากาศภายใน รวมทั้งอาคารเตี้ยบางประเภท เช่น คลังสินค้าที่ไม่มีหน้าต่างหรือช่องเปิด โดยที่ประตูต้องออกแบบให้สามารถต้านพายุได้ และได้รับการปิดสนิทเมื่อเกิดพายุ

กรณีที่ 2 ใช้ค่า $C_{pi} = -0.45$ ถึง 0.3

กรณีนี้ใช้กับอาคารที่มีการรั่วซึมซึ่งกระจายไม่สม่ำเสมอ โดยที่อาจมีช่องเปิดขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่ต้องได้รับการปิดสนิท เมื่อเกิดพายุและมีความแข็งแรงเพียงพอ ตัวอย่างได้แก่ อาคารขนาดเล็กทั่วๆไป และอาคารสูงที่มีหน้าต่างซึ่งสามารถเปิด-ปิดได้ หรือมีระเบียงซึ่งมีประตูที่สามารถเปิด-ปิดได้

กรณีที่ 3 ใช้ค่า $C_{pi} = -0.7$ ถึง 0.7

กรณีนี้ใช้กับอาคารที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ โดยที่ความแปรปรวนของลมภายนอกอาคาร สามารถส่งผลเข้าไปภายในได้ ตัวอย่างได้แก่ อาคารโรงงานอุตสาหกรรมและคลังสินค้าที่ประตูอาจจะเปิดในระหว่างเกิดพายุ หรือประตูไม่สามารถต้านพายุได้

2.7 แรงลมออกแบบ สำหรับโครงสร้างหลัก และโครงสร้างรองของอาคารเตี้ย ในรูปแบบใช้ตาราง

แรงลมออกแบบสำหรับโครงสร้างหลัก และโครงสร้างรองของอาคารเตี้ย นอกจากการใช้สูตรการคำนวณโดยตรง ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมในภาคผนวก ข.1 แล้ว ยังสามารถใช้ค่าแรงลมออกแบบดังแสดงในภาคผนวก ค.1 สำหรับแรงลมออกแบบสำหรับโครงสร้างหลักของอาคารเตี้ย และ ค.2 สำหรับแรงลมออกแบบสำหรับโครงสร้างรองของอาคารเตี้ยได้

2.8 การรวมผลของแรงลมเนื่องจากแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิด

การรวมผลของแรงลมเนื่องจากแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิด เพื่อคำนึงถึงการกระจายที่ไม่สมมาตรของหน่วยแรงลม และผลของลมกระทำที่มุมปะทะต่างๆ กับอาคาร ซึ่งบางกรณีมีผลมากกว่าลมกระทำตั้งฉากกับอาคาร

การรวมผลของแรงลมในหัวข้อนี้ ใช้กับโครงสร้างต่อไปนี้

ก. อาคารสูงปานกลาง ตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.1ก และ

ข. อาคารรูปทรงปกติที่มีความสมมาตรทางโครงสร้าง กล่าวคือ จุดศูนย์กลางแรงเฉือน และจุดศูนย์กลางมวลของแต่ละชั้นจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน หรือห่างกันเล็กน้อย

อาคารและองค์อาคาร จะต้องออกแบบให้สามารถรับแรงต่างๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของแรงลมซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2-2) และในรูปที่ ข.9 ในลักษณะต่างๆดังต่อไปนี้

ก. หน่วยแรงลมกระทำร้อยละ 100 เต็มพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลม โดยพิจารณาแรงลมที่กระทำทีละทิศทางตามแกนหลักของอาคาร (แกน X และแกน Y) ตามรูปที่ 2.2(ก)

ข. หน่วยแรงลมกระทำร้อยละ 75 เต็มพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลม พร้อมกับโมเมนต์บิดตามรูปที่ 2.2(ข) โดยพิจารณาหน่วยแรงลมและโมเมนต์บิดกระทำทีละทิศทาง ตามแกนหลักของอาคาร

ค. หน่วยแรงลมกระทำเหมือนข้อ ก. แต่กระทำร้อยละ 75 ของแรงในข้อ ก. เต็มพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลม และพิจารณาหน่วยแรงลมกระทำพร้อมกันทั้ง 2 ทิศทางตามแกนหลักของอาคาร ตามรูปที่ 2.2(ค) ทั้งนี้เพื่อคำนึงถึงผลของลมที่กระทำในทิศทางที่ไม่อยู่ในแนวตั้งฉากกับผนังของอาคาร

ง. หน่วยแรงลมกระทำเหมือนข้อ ข. แต่กระทำร้อยละ 75 ของแรงในข้อ ข. เต็มพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลม และพิจารณาหน่วยแรงลมและโมเมนต์บิดกระทำพร้อมกันทั้ง 2 ทิศทาง ตามแกนหลักของอาคาร ตามรูปที่ 2.2(ง)

โดยที่

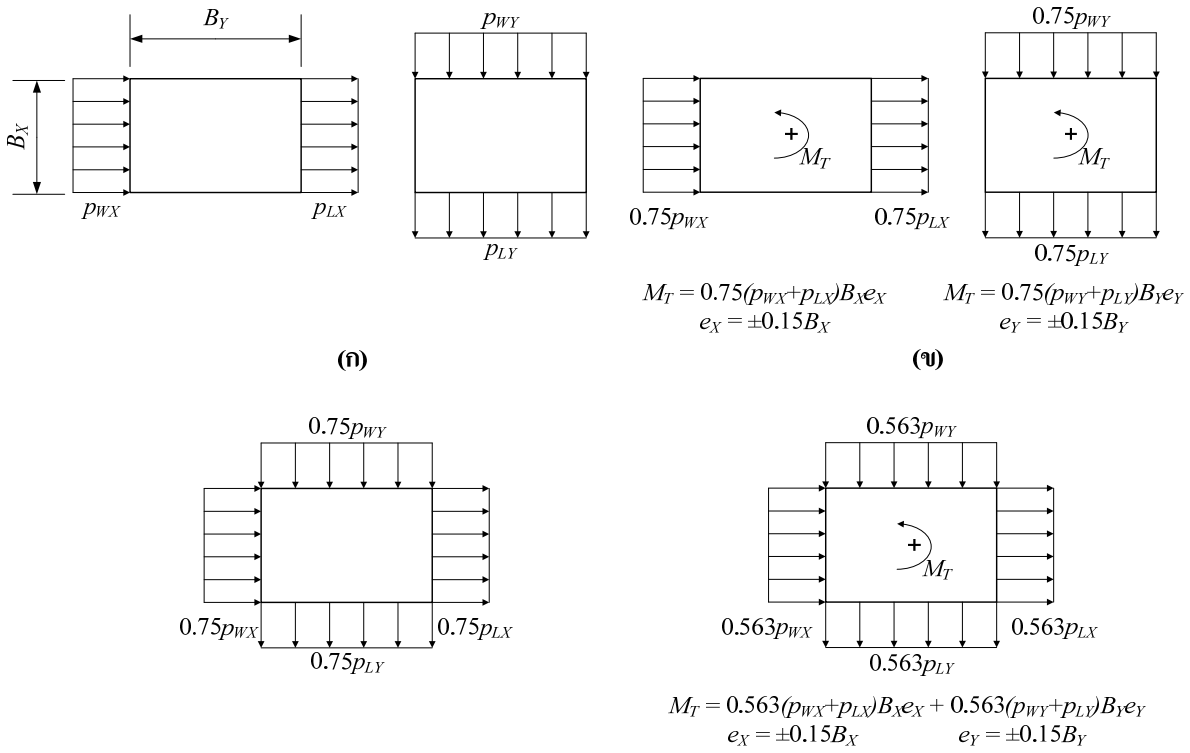
B_x, B_y = ขนาดของอาคารในแต่ละทิศทาง

e_X, e_Y = ระยะเยื้องศูนย์ ในทิศทางแกนหลัก X และ Y ของอาคาร ตามลำดับ

p_{WX}, p_{WY} = หน่วยแรงลมด้านต้นลม ในทิศทางแกนหลัก X และ Y ของอาคาร ตามลำดับ

p_{LX}, p_{LY} = หน่วยแรงลมด้านท้ายลม ในทิศทางแกนหลัก X และ Y ของอาคาร ตามลำดับ

M_T = โมเมนต์บิดต่อความสูง 1 เมตร



รูปที่ 2.2 การรวมผลของแรงลมเนื่องจากแรงลมในทิศทางลม ตั้งฉากกับทิศทางลม และการบิด

บทที่ 3
การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า และการตอบสนองในทิศทางลม โดยวิธีการอย่างละเอียด

3.1 การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างละเอียด

การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างละเอียด ใช้กับโครงสร้างต่อไปนี้

ก. อาคารที่มีความสูงเกิน 80 เมตร หรือมีความสูงเกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิผลที่น้อยที่สุด ตามที่กำหนดในสมการ (2-1)

ข. อาคารที่สั่นไหวง่าย ได้แก่ อาคารที่มีน้ำหนักเบา และมีความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ต่ำ และมีคุณสมบัติความหน่วง (damping properties) ของอาคารต่ำ

3.2 แรงลมออกแบบ

แรงลมออกแบบสำหรับวิธีการอย่างละเอียด สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการแบบเดียวกับสมการ ในหัวข้อ 2.2 รวมทั้งค่าประกอบความสำคัญของแรงลม (I_w) หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q) และค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (C_p) สามารถคำนวณโดยใช้หลักการแบบเดียวกับวิธีการอย่างง่าย ยกเว้นค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) และค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (C_g) ซึ่งต่างกับวิธีการอย่างง่าย และให้คำนวณตามบทนี้

3.3 หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q)

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม สำหรับวิธีการอย่างละเอียด สามารถคำนวณได้ โดยใช้หลักการแบบเดียวกับสมการในหัวข้อ 2.3

3.4 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ เป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมให้แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ

การคำนวณค่าแรงลมโดยวิธีการอย่างละเอียด คำนึงถึงสภาพภูมิประเทศเป็น 3 แบบ ดังนี้

ก. สภาพภูมิประเทศแบบ A เป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่งซึ่งมีอาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้าง กระจัดกระจายอยู่ห่างๆ กัน หรือเป็นบริเวณชายฝั่งทะเล ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (3-1) หรือใช้ค่าจากตาราง 3-1

$$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.28} \qquad (3\text{-}1)$$

โดยที่ถ้า C_e ที่คำนวณจากสมการ (3-1) มีค่าน้อยกว่า 1.0 หรือมากกว่า 2.5 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 1.0 หรือ 2.5 ตามลำดับ

ข. สภาพภูมิประเทศแบบ B เป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือพื้นที่ที่มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดเล็ก ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (3-2) หรือใช้ค่าจากตาราง 3-1

$$C_e = 0.5\left(\frac{z}{12.7}\right)^{0.5} \qquad (3\text{-}2)$$

โดยที่ ถ้า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ (3-2) มีค่าน้อยกว่า 0.5 หรือมากกว่า 2.5 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 0.5 หรือ 2.5 ตามลำดับ

ค. สภาพภูมิประเทศแบบ C เป็นสภาพภูมิประเทศของบริเวณศูนย์กลางเมืองใหญ่ มีอาคารสูงอยู่หนาแน่น โดยที่อาคารไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ต้องมีความสูงเกิน 4 ชั้น ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (3-3) หรือใช้ค่าจากตาราง 3-1

$$C_e = 0.4\left(\frac{z}{30}\right)^{0.72} \qquad (3\text{-}3)$$

โดยที่ ถ้า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ (3-3) มีค่าน้อยกว่า 0.4 หรือมากกว่า 2.5 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 0.4 หรือ 2.5 ตามลำดับ

อาคารที่ตั้งอยู่ในภูมิประเทศแบบ C ควรพิจารณาด้วยความรอบคอบ เนื่องจากอาจเกิดแรงลมที่สูงจากช่องลมที่เกิดจากการสร้างอาคาร และผลของระลอกลมที่เกิดจากอาคารสูงข้างเคียง

สภาพภูมิประเทศใดๆ จะจัดอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ B หรือ C ได้ก็ต่อเมื่อมีลักษณะภูมิประเทศในลักษณะนั้นๆ สม่ำเสมอในทิศทางต้นลม เป็นระยะทางไม่ต่ำกว่า 1 กิโลเมตร หรือ 10 เท่าของความสูงของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่า ซึ่งสภาพภูมิประเทศที่ใช้ในการคำนวณนี้ ควรสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศที่แท้จริงในทิศทางลมที่พิจารณา

ตารางที่ 3-1 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) สำหรับวิธีการอย่างละเอียด

ความสูงจากพื้นดิน	สภาพภูมิประเทศ แบบ A	สภาพภูมิประเทศ แบบ B	สภาพภูมิประเทศ แบบ C
สูงไม่เกิน 10 เมตร	1.00	0.50	0.40
สูงเกิน 10 เมตรแต่ไม่เกิน 20 เมตร	1.21	0.63	0.40
สูงเกิน 20 เมตรแต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.47	0.89	0.49
สูงเกิน 40 เมตรแต่ไม่เกิน 80 เมตร	1.79	1.25	0.81
สูงเกิน 80 เมตรแต่ไม่เกิน 120 เมตร	2.01	1.54	1.09
สูงเกิน 120 เมตรแต่ไม่เกิน 160 เมตร	2.17	1.77	1.34
สูงเกิน 160 เมตรแต่ไม่เกิน 200 เมตร	2.31	1.98	1.57
สูงเกิน 200 เมตรแต่ไม่เกิน 250 เมตร	2.46	2.22	1.84
สูงเกิน 250 เมตรแต่ไม่เกิน 300 เมตร	2.50	2.43	2.10

3.5 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (C_g)

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม คือ อัตราส่วนระหว่างผลของแรงลมสูงสุดต่อผลของแรงลมเฉลี่ยเป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลม โดยรวมผลที่เกิดจาก

1) การแปรปรวนของความเร็วลม (random wind gusts) ที่พัดเข้าหาอาคาร
2) หน่วยแรงลมที่ผันผวนจากผลของของระลอกลม (wake-induced fluctuating pressure) โดยรอบอาคาร

3) การตอบสนองด้านพลศาสตร์ของอาคาร

ค่าประกอบ C_g สำหรับวิธีการอย่างละเอียด คำนวณได้ดังนี้

$$C_g = 1 + g_p\left(\frac{\sigma}{\mu}\right) \qquad (3\text{-}4)$$

โดยที่ g_p = ค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด (statistical peak factor) สำหรับการสั่นไหวของอาคารในทิศทางลม หาค่าได้จากรูปที่ 3.4 หรือจากสมการ (3-9)

σ = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของผลตอบสนองด้านพลศาสตร์ของอาคารเนื่องจากความผันผวนของแรงลม (root-mean-square loading effect)

μ = ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของอาคารเนื่องจากแรงลม (mean loading effect)

อัตราส่วน σ/μ สามารถคำนวณได้จากสมการ (3-5) ดังนี้

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}}\left(B + \frac{sF}{\beta_D}\right)} \qquad (3\text{-}5)$$

โดยที่ K = ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามความขรุขระของสภาพภูมิประเทศโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ
0.08 สำหรับภูมิประเทศแบบ A
0.10 สำหรับภูมิประเทศแบบ B
0.14 สำหรับภูมิประเทศแบบ C

C_{eH} = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่ระดับความสูงของยอดอาคาร โดยให้คำนวณจากสมการในหัวข้อ 3.4

B = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกึ่งสถิตต่อการแปรปรวนของลม (background turbulence factor) ซึ่งเป็น ฟังก์ชันของอัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของอาคาร (W/H) และหาได้จากรูปที่ 3.1 หรือจากสมการ (3-6)

W = ความกว้างประสิทธิผลของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม หาได้จากสมการ (2-1) มีหน่วยเป็นเมตร

H = ความสูงของอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร

$\frac{sF}{\beta_D}$ = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลม (resonance factor) ในทิศทางลม

s = ตัวคูณลดเนื่องจากขนาดของอาคาร (size reduction factor) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ W/H และความถี่ธรรมชาติลดรูป (reduction frequency of structure, $\frac{n_D H}{V_H}$) และหาค่าได้จากรูปที่ 3.2 หรือจากสมการ (3-7)

n_D = ค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร สำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางลม (fundamental natural frequency in along-wind direction) มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz) ซึ่งค่านี้อาจหาได้จากการวิเคราะห์โดยตรงจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของอาคาร ในกรณีที่เป็นอาคารสูงสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กอาจประมาณค่าความถี่ธรรมชาติจากสูตร $n_D = \frac{44}{H}$

V_H = ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ระดับความสูงของยอดอาคาร มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที คำนวณได้จากสมการ $V_H = \overline{V}\sqrt{C_{eH}}$

F = อัตราส่วนพลังงานของการแปรปรวนของลม ณ ความถี่ธรรมชาติของอาคาร (gust energy ratio at the natural frequency of the structure) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ จำนวนคลื่นต่อเมตร (wave number, $\frac{n_D}{V_H}$) หาค่าได้จากรูปที่ 3.3 หรือ จากสมการ (3-8)

β_D = อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) ของการสั่นไหวในทิศทางลม ซึ่งค่านี้ควรกำหนดให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดอาคารจริงที่มีลักษณะใกล้เคียงกับอาคารที่ออกแบบ โดยทั่วไป สำหรับอาคารโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาจใช้ค่า β อยู่ระหว่าง 0.005 ถึง 0.015 ขึ้นกับระดับของการสั่นไหว

ν = ค่าความถี่เฉลี่ยของการตอบสนองของโครงสร้าง (average fluctuation rate) มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz) คำนวณได้จากสมการ (3-11)

สมการที่ใช้คำนวณค่า B, s, F และ g_p ตามลำดับเป็นดังต่อไปนี้

$$B = \frac{4}{3}\int_{0}^{914/H}\left[\frac{1}{1+\frac{zH}{457}}\right]\left[\frac{1}{1+\frac{zW}{122}}\right]\left[\frac{z}{\left(1+z^2\right)^{4/3}}\right]dz \qquad (3\text{-}6)$$

$$s = \frac{\pi}{3}\left[\frac{1}{1+\frac{8n_D H}{3V_H}}\right]\left[\frac{1}{1+\frac{10n_D W}{V_H}}\right] \qquad (3\text{-}7)$$

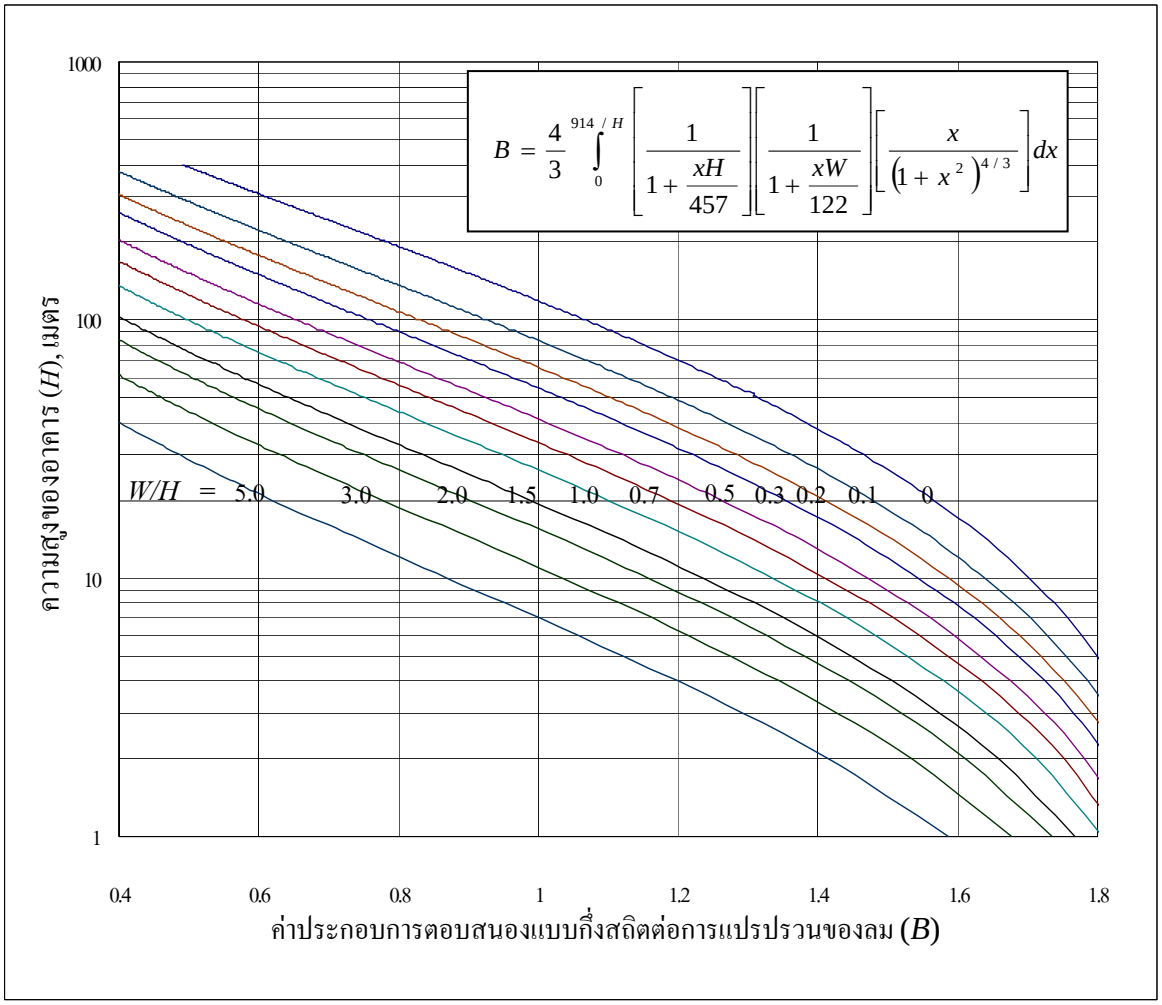
$$F = \frac{{x_0}^2}{\left(1+{x_0}^2\right)^{4/3}} \qquad (3\text{-}8)$$

$$g_p = \sqrt{2\log_e vT} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e vT}} \qquad (3\text{-}9)$$

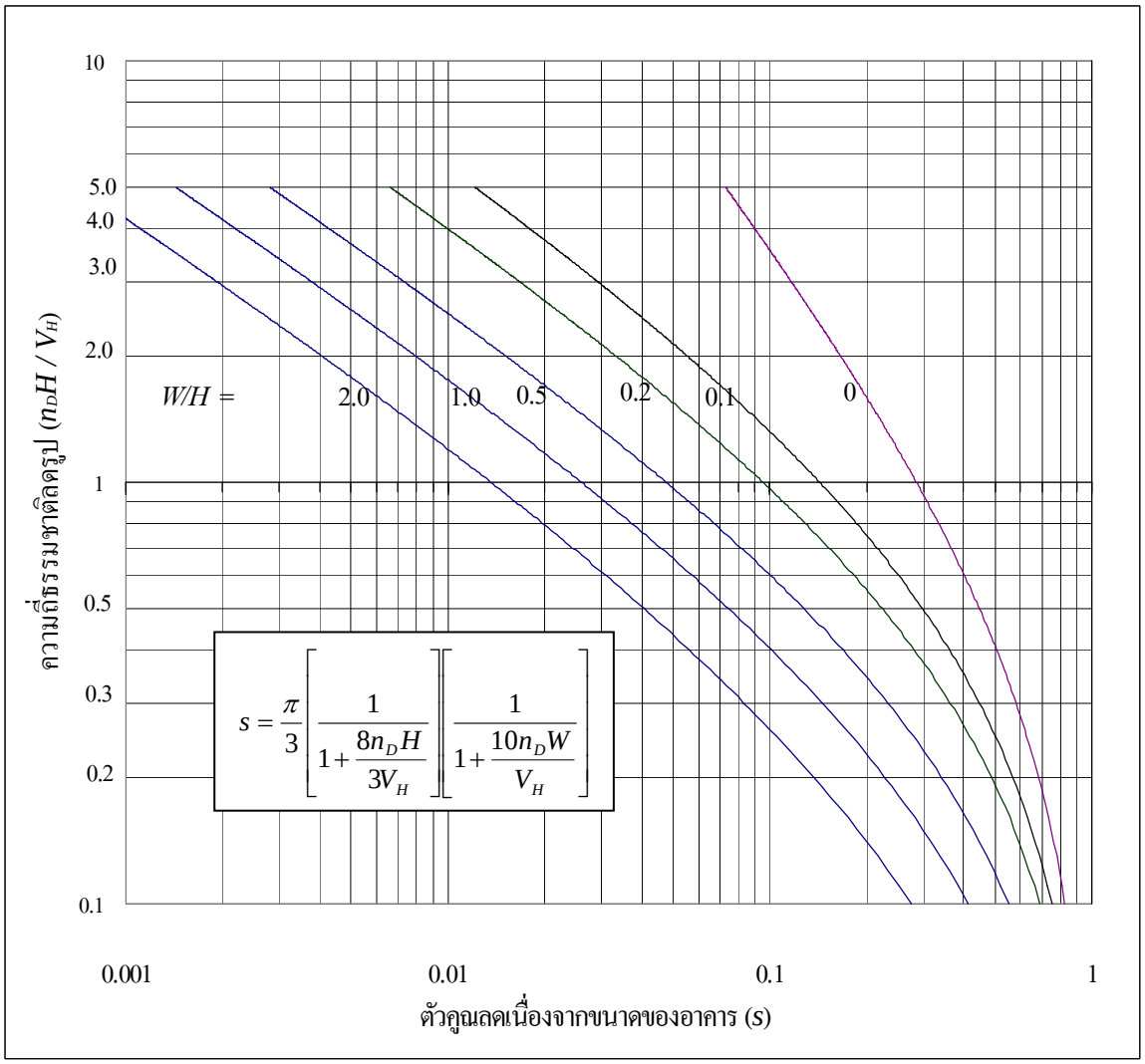
โดยที่ $$x_0 = \frac{1220n_D}{V_H} \qquad (3\text{-}10)$$

$$v = n_D\sqrt{\frac{sF}{sF+\beta_D B}} \qquad (3\text{-}11)$$

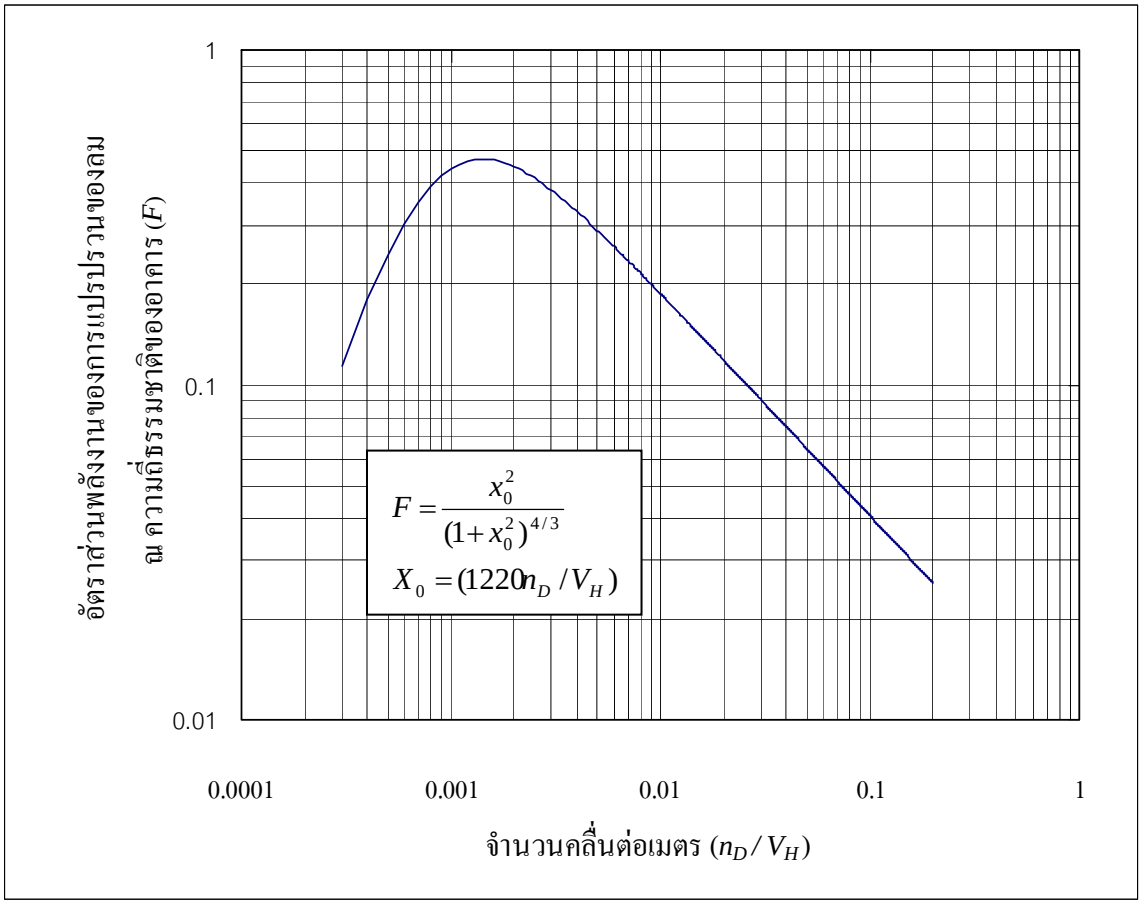
$T = 3600$ วินาที



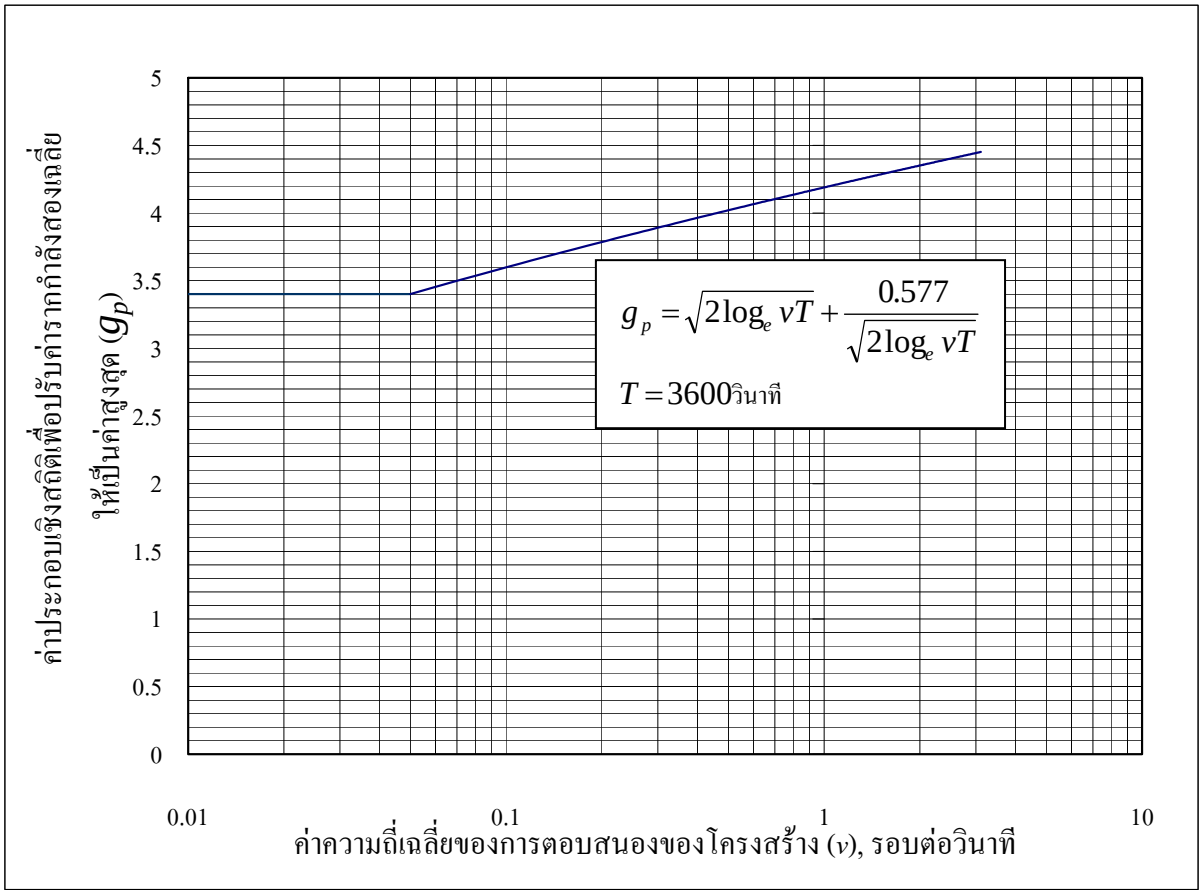
รูปที่ 3.1 แผนภูมิเพื่อหาค่าประกอบการตอบสนองแบบกึ่งสถิตต่อการแปรปรวนของลม (B) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของ W/H และความสูงของอาคาร



รูปที่ 3.2 แผนภูมิเพื่อหาค่าตัวคูณลดเนื่องจากลักษณะของอาคาร (s) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ W/H และความถี่ธรรมชาติลดรูป



รูปที่ 3.3 แผนภูมิเพื่อหาค่าอัตราส่วนพลังงานของการแปรปรวนของลม ณ ความถี่ธรรมชาติของอาคาร (F) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของจำนวนคลื่นต่อเมตร



รูปที่ 3.4 แผนภูมิเพื่อหาค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองให้เป็นค่าสูงสุด (g_p) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าความถี่เฉลี่ยของการตอบสนองของโครงสร้าง

3.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p)

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกสำหรับอาคารสูง แสดงในรูปที่ ข.9 ในภาคผนวก ข-2 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายใน สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการแบบเดียวกับหัวข้อ 2.6.2

3.7 การโก่งตัวทางด้านข้าง (Lateral Deflection)

อาคารจะต้องได้รับการออกแบบให้มีการโก่งตัวทางด้านข้าง เนื่องจากแรงลมไม่เกินค่าพิกัดที่กำหนด โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อการใช้งานของอาคารและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับองค์อาคารหลัก และองค์อาคารรอง และคำนึงถึงการคืบตัว การหดตัว และผลอันเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การคำนวณระยะโก่งตัวของอาคารที่มีความชะลูด ให้คำนึงถึงผลที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำกับอาคาร ในตำแหน่งที่มีการโก่งตัวไปด้วย ซึ่งเรียกว่า ผลของ พี-เดลต้า (P-Δ effect)

ระยะโก่งตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้น ณ ยอดอาคาร สำหรับน้ำหนักบรรทุกจากแรงดึงดูดของโลก (gravity loads) ร่วมกับแรงลมสถิตเทียบเท่าที่ความเร็วลมอ้างอิง ที่คูณด้วยค่าประกอบความสำคัญของแรงลมในสภาวะจำกัดด้านการใช้งานเท่ากับ 0.75 (ตาราง 2-2) จะต้องไม่เกิน 1/500 ของความสูงของอาคาร

การคำนวณระยะโก่งตัวด้านข้างสูงสุดในทิศทางแนวราบ ณ ยอดอาคาร (Δ) ภายใต้แรงลมสถิตเทียบเท่า สามารถคำนวณได้โดยใช้การวิเคราะห์โครงสร้างที่เหมาะสม ในการออกแบบเบื้องต้นของอาคารที่มีมวลกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูง และสมมติรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานเป็นเชิงเส้น การโก่งตัวด้านข้างสูงสุดภายใต้แรงลมสถิตเทียบเท่า มีหน่วยเป็นเมตร สามารถคำนวณได้โดยประมาณ จาก

$$\Delta = \frac{3\left(\frac{H^2}{2+\alpha}\right) I_w q C_{eH} C_g C_p}{4\pi^2 n_D^2 D \rho_B H^2} \qquad (3\text{-}12)$$

โดยที่ I_w = ค่าประกอบความสำคัญของแรงลมในสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน (ตารางที่ 2-2) = 0.75

C_{eH} = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่ระดับยอดอาคาร

C_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมด้านต้นลมและท้ายลม
= 0.8-(-0.5) = 1.3

α = ตัวยกกำลังของค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ ในสมการ (3-1) ถึง (3-3)

D = ความลึกของอาคารในทิศทางขนานกับทิศทางลม

ρ_B = ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (average density of the building) กล่าวคือ ค่ามวลทั้งหมดของอาคาร หารด้วยปริมาตรของอาคารที่ถูกห่อหุ้มด้วยพื้นผิวภายนอกอาคาร (enclosure volume) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมอาจคำนวณได้จาก $\frac{\text{มวลทั้งหมดของอาคาร}}{WDH}$ โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 150-300 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร

3.8 การสั่นไหวของอาคาร (Building Motion)

ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร จะต้องจำกัดการสั่นไหวของอาคาร เพื่อไม่ให้ผู้ใช้อาคารรู้สึกไม่สบาย หรือเกิดอาการวิงเวียน ความรุนแรงของการสั่นไหวของอาคารที่มีผลต่อผู้ใช้อาคารสามารถวัดได้ในรูปของอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบ (maximum horizontal acceleration) ทั้งในทิศทางลม (along-wind direction) และทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (across-wind direction) ตามที่กำหนดในบทที่ 4

อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศทางลม (a_D) มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที^{2} สามารถคำนวณโดยประมาณได้จาก

$$a_D = 4\pi^2 n_D^2 g_p \sqrt{\frac{KsF}{C_{eH}\beta_D}} \cdot \frac{\Delta}{C_g} \qquad (3\text{-}13)$$

โดยที่ β_D = อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) ของการสั่นไหวในทิศทางลม

ค่าอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบทั้งในทิศทางลม ซึ่งคำนวณจากสมการ (3-13) และทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ซึ่งคำนวณจากหัวข้อ 4.3 กับสภาพลมที่ความเร็วลมอ้างอิง ที่พิจารณาค่าประกอบความสำคัญของแรงลม (I_w) ในสภาวะจำกัดด้านการใช้งานเท่ากับ 0.75 (ตารางที่ 2-2) จะต้อง

มีค่าไม่เกินกว่า 0.15 เมตรต่อวินาที^{2} ในกรณีของอาคารที่พักอาศัย (residential buildings) หรือ 0.25 เมตรต่อวินาที^{2} ในกรณีของอาคารพาณิชย์ (commercial buildings)

นอกจากนี้ การคำนวณการโก่งตัวด้านข้างตามสมการที่ (3-12) และอัตราเร่งสูงสุดตามสมการที่ (3-13) สามารถใช้ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 10 ปี สำหรับคำนวณตัวแปรในสมการดังกล่าวได้โดยตรง และไม่ต้องใช้ค่า I_w ในสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน

บทที่ 4
การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าและการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

4.1 การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม การตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม การตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า มีขอบเขตการใช้กับโครงสร้างต่อไปนี้

ก. โครงสร้างที่ต้องพิจารณาแรงลมและผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า คือโครงสร้างที่มีอัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ ตั้งแต่ 3 ขึ้นไป

ข. ข้อกำหนดในบทนี้ ใช้กับอาคารที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมสม่ำเสมอ ที่มีอัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ ไม่เกิน 6 และอัตราส่วน $\frac{D}{W}$ มีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 5

ค. ข้อกำหนดในหัวข้อ 4.2 4.3 และ 4.5 ใช้กับอาคารที่มีอัตราส่วน $\frac{V_H}{n_W\sqrt{WD}}$ มีค่าไม่เกิน 10

ง. ข้อกำหนดในหัวข้อ 4.4 และ 4.5 ใช้กับอาคารที่มีอัตราส่วน $\frac{V_H}{n_T\sqrt{WD}}$ มีค่าไม่เกิน 10

4.2 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

แรงลมที่กระทำกับอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม สามารถคำนวณได้จาก

$$P_L = 3I_w q_H C_L^{'} A \frac{z}{H} g_L \sqrt{1+R_L} \qquad (4\text{-}1)$$

โดยที่ P_L = แรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม ที่ความสูง z จากพื้นดิน มีหน่วยเป็น นิวตัน

I_w = ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม ดังแสดงในตารางที่ 2-2

q_H = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลมที่ระดับความสูงยอดอาคาร คำนวณได้จาก

$$q_H = \frac{1}{2}\rho V_H^2 \qquad (4\text{-}2)$$

$C_L^{'}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม โดยเป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์พลิกคว่ำในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (root-mean-square of overturning moment coefficient in across-wind direction) มีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของขนาดอาคาร (D/W) และหาค่าได้จากรูปที่ 4.1 หรือสมการที่ (4-3)

$$C_L^{'} = 0.0082\left(\frac{D}{W}\right)^3 - 0.071\left(\frac{D}{W}\right)^2 + 0.22\left(\frac{D}{W}\right) \qquad (4\text{-}3)$$

A = พื้นที่รับลม มีค่าเท่ากับผลคูณของความกว้างของอาคาร (W) กับมิติในแนวดิ่งของพื้นที่ที่พิจารณาแรง มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

z = ความสูงจากพื้นดิน มีหน่วยเป็นเมตร

g_L = ค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม คำนวณได้ดังนี้

$$g_L = \sqrt{2\log_e(3600 n_W)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600 n_W)}} \qquad (4\text{-}4)$$

n_W = ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz) ซึ่งค่านี้อาจหาได้จากการวิเคราะห์โดยตรงจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของอาคาร ในกรณีที่เป็นอาคารสูงสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กอาจประมาณค่าจาก $n_W = \frac{44}{H}$

R_L = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม คำนวณได้ดังนี้

$$R_L = \frac{\pi F_L}{4\beta_W} \qquad (4\text{-}5)$$

β_W = ค่าอัตราส่วนความหน่วงของการสั่นไหวของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมโดยทั่วไป สำหรับอาคารโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาจใช้ค่า β_W อยู่ระหว่าง 0.005 ถึง 0.015 ขึ้นกับระดับของการสั่นไหว

F_L = ค่าสเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม มีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของขนาดอาคาร (D/W) หาค่าได้จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 หรือคำนวณดังนี้ สำหรับอาคารที่มีอัตราส่วน (D/W) น้อยกว่า 3.0 ให้คำนวณ F_L จากสมการที่ (4-6) เพียงหนึ่งพจน์ $(N=1)$ และสำหรับอาคารที่มีอัตราส่วน (D/W) ตั้งแต่ 3.0 ขึ้นไป ให้คำนวณ F_L จากสมการที่ (4-6) เป็นผลรวมของสองพจน์ $(N=2)$ ดังนี้

$$F_L = \sum_{j=1}^{N} \frac{4\kappa_j (1+0.6\beta_j)\beta_j}{\pi} \frac{\lambda_j^2}{(1-\lambda_j^2)^2 + 4\beta_j^2\lambda_j^2} \qquad (4\text{-}6)$$

$N=1$ สำหรับ $(D/W) < 3.0$

$N=2$ สำหรับ $(D/W) \geq 3.0$

$\kappa_1 = 0.85$

$\kappa_2 = 0.02$

ค่าคงที่ β_j และ λ_j เป็นค่าที่กำหนดรูปร่างของสเปกตรัมของแรงลม โดยคำนวณดังนี้

$$\beta_1 = \frac{\left(\frac{D}{W}\right)^4 + 2.3\left(\frac{D}{W}\right)^2}{2.4\left(\frac{D}{W}\right)^4 - 9.2\left(\frac{D}{W}\right)^3 + 18\left(\frac{D}{W}\right)^2 + 9.5\left(\frac{D}{W}\right) - 0.15} + \frac{0.12}{(D/W)} \qquad (4\text{-}7)$$

$$\beta_2 = \frac{0.28}{(D/W)^{0.34}} \qquad (4\text{-}8)$$

$$\lambda_1 = \frac{\left(1+0.38(D/W)^2\right)^{0.89}}{0.12} \frac{n_W W}{V_H} \qquad (4\text{-}9)$$

$$\lambda_2 = \frac{(D/W)^{0.85}}{0.56} \frac{n_W W}{V_H} \qquad (4\text{-}10)$$

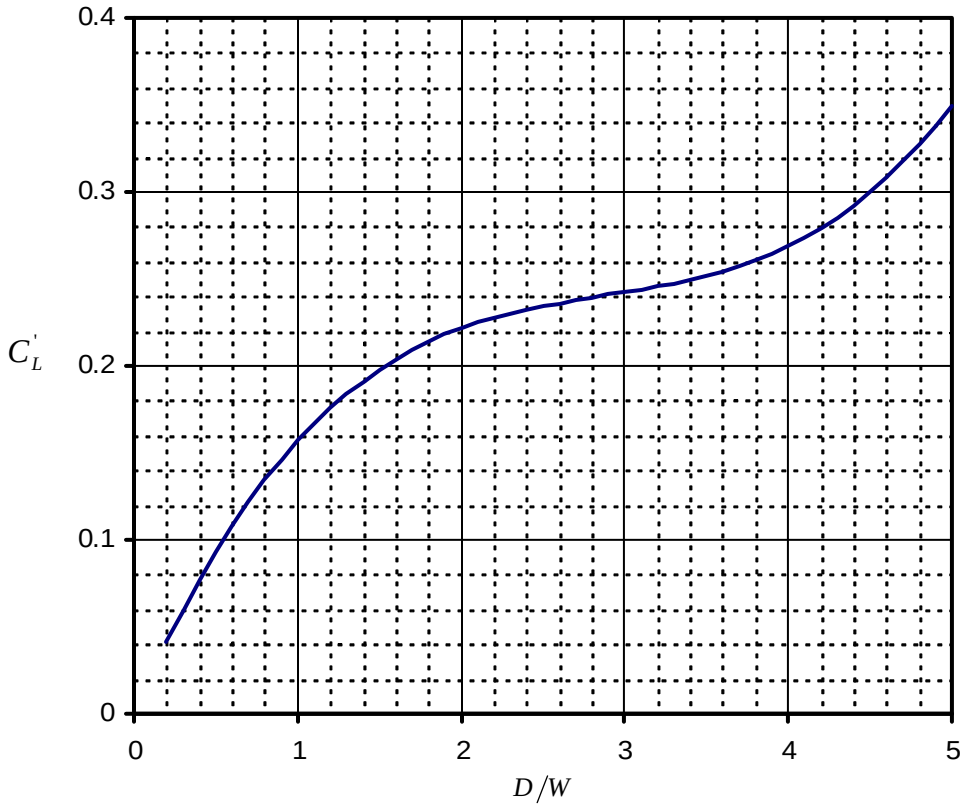
4.3 การสั่นไหวของอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (a_w) ที่ความสูง z จากพื้นดิน มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที^{2} สามารถคำนวณค่าโดยประมาณได้จาก

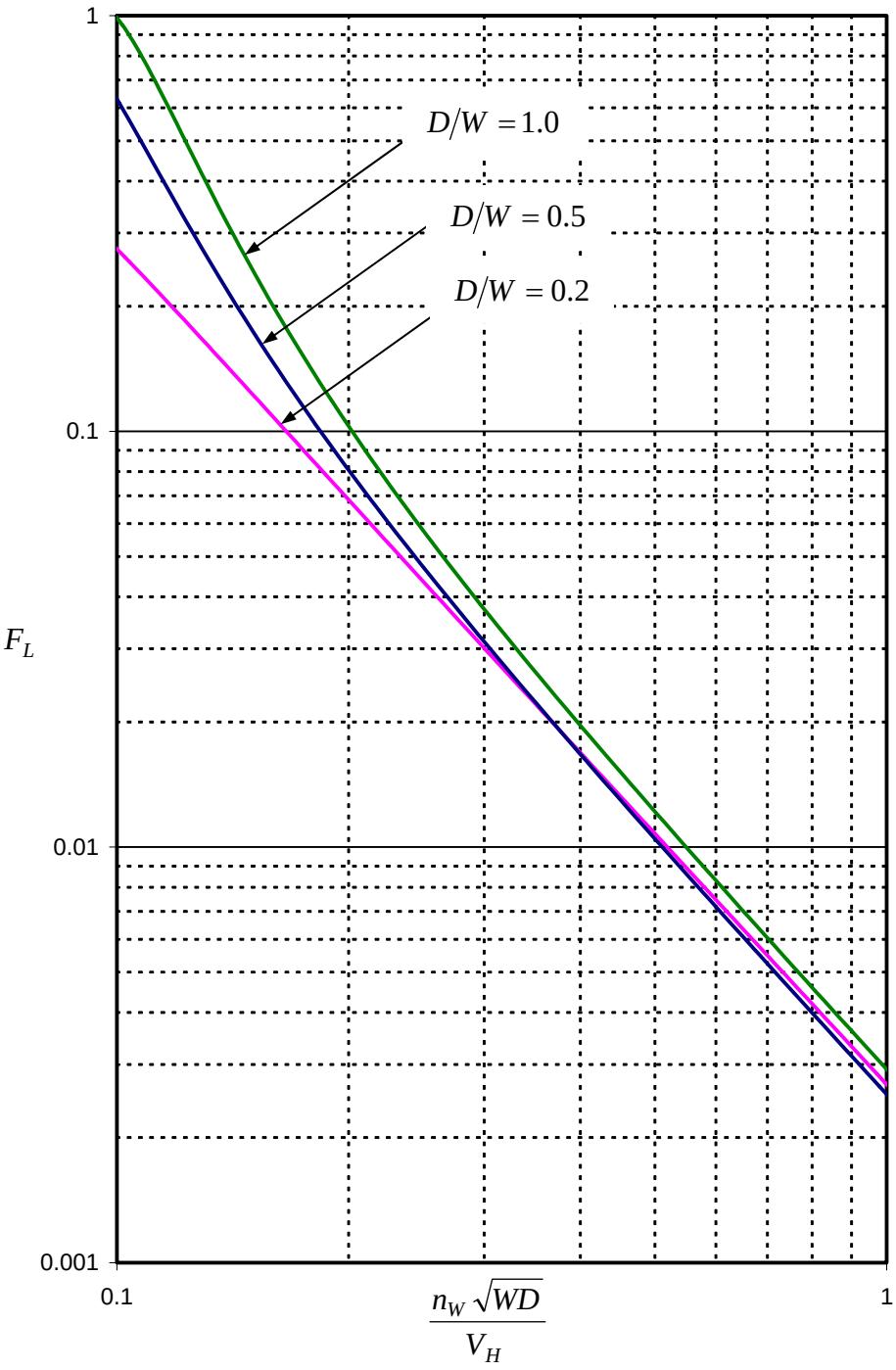
$$a_w = 3 I_w q_H C_L^{'} g_L \frac{W}{(\rho_B W D)} \frac{z}{H} \sqrt{R_L} \qquad (4\text{-}11)$$

โดยที่ ρ_B = ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (average density of the building) ตามที่กำหนดในหัวข้อ 3.7

นอกจากนี้ การคำนวณอัตราเร่งสูงสุดตามสมการที่ (4-11) สามารถใช้ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 10 ปี สำหรับคำนวณตัวแปรในสมการดังกล่าวได้โดยตรง และไม่ต้องใช้ค่า I_w ในสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน

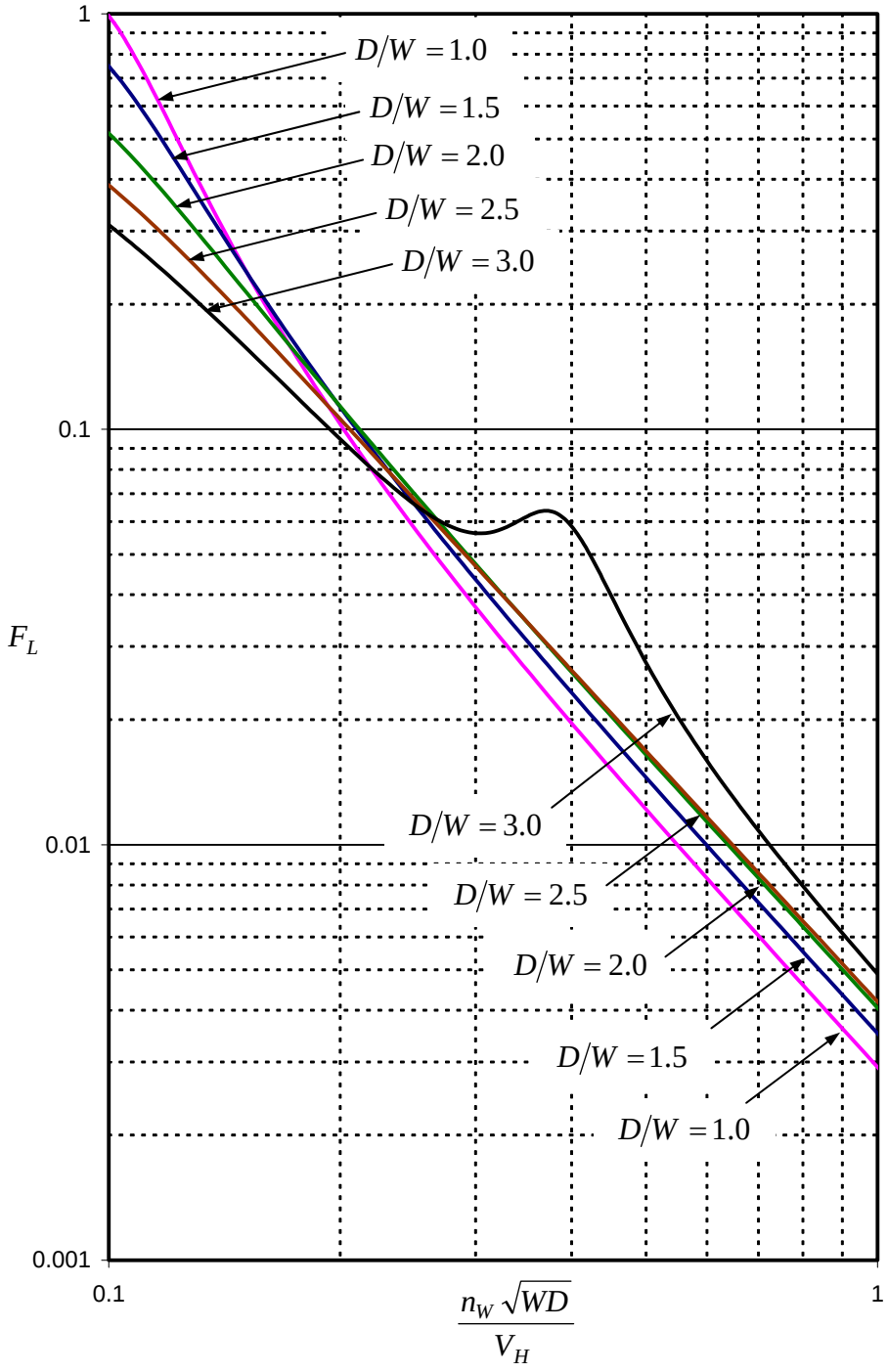


รูปที่ 4.1 สัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม



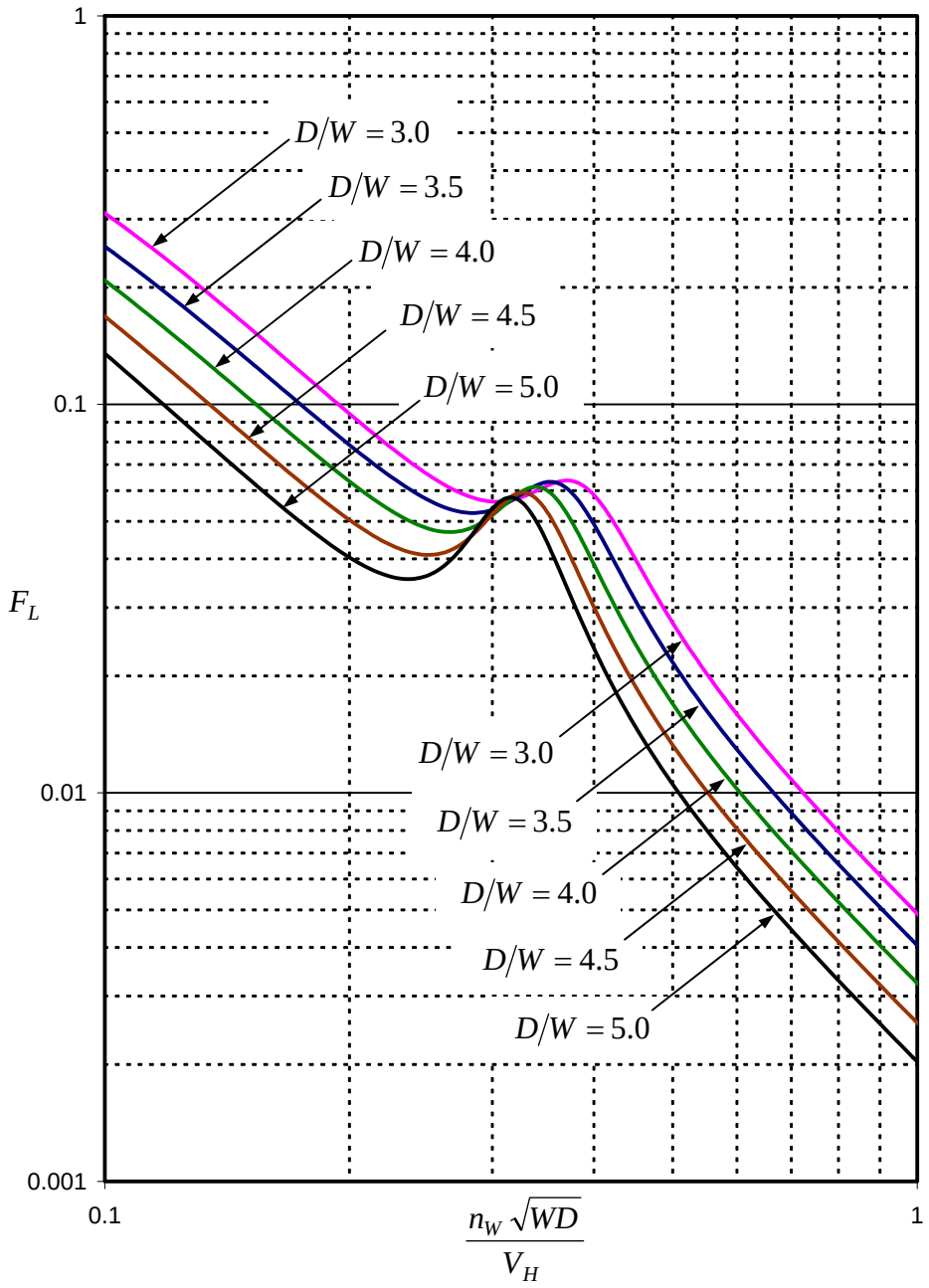
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม

สำหรับ $D/W = 0.2, 0.5$ และ 1.0



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม

สำหรับ $D/W = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม
สำหรับ $D/W = 3.0, 3.5, 4.0, 4.5$ และ 5.0

4.4 โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าเนื่องจากลม สามารถคำนวณได้จาก

$$M_T = 1.8 I_w q_H C_T^{'} AW \frac{z}{H} g_T \sqrt{1+R_T} \qquad (4\text{-}12)$$

โดยที่ M_T = โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าเนื่องจากลมที่กระทำกับอาคาร ที่ความสูง z จากพื้นดิน มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร

$C_T^{'}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์บิด โดยเป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด (root-mean-square of torsional moment coefficient) มีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของขนาดอาคาร (D/W) และหาค่าได้จากรูปที่ 4.5 หรือสมการที่ (4-13)

$$C_T^{'} = \left\{0.0066 + 0.015(D/W)^2\right\}^{0.78} \qquad (4\text{-}13)$$

g_T = ค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในแนวบิด คำนวณได้ดังนี้

$$g_T = \sqrt{2\log_e(3600 n_T)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600 n_T)}} \qquad (4\text{-}14)$$

n_T = ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในแนวบิด มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz) ซึ่งค่านี้อาจหาได้จากการวิเคราะห์โดยตรงจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของอาคาร ในกรณีที่เป็นอาคารสูงสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กอาจประมาณค่าจาก $n_T = \frac{55}{H}$

R_T = ค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลมในแนวบิดของอาคาร คำนวณได้ดังนี้

$$R_T = \frac{\pi F_T}{4\beta_T} \qquad (4\text{-}15)$$

β_T = ค่าอัตราส่วนความหน่วงของการสั่นไหวของอาคารในแนวบิด โดยทั่วไปสำหรับอาคารโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาจใช้ค่า β_T อยู่ระหว่าง 0.005 ถึง 0.015 ขึ้นกับระดับของการสั่นไหว

F_T = ค่าสเปกตรัมของแรงลมในแนวบิดของอาคาร มีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของขนาดอาคาร (D/W) และค่า $V_T^* = \dfrac{V_H}{n_T\sqrt{WD}}$ โดยหาค่าได้จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 หรือคำนวณดังนี้

สำหรับ $V_T^* \le 4.5$ หรือ $6 \le V_T^* \le 10$

$$F_T = \frac{0.14K_T^2\left(V_T^*\right)^{2\lambda_T}}{\pi}\frac{D\left(W^2+D^2\right)^2}{L^2W^3} \qquad (4\text{-}16)$$

สำหรับ $4.5 < V_T^* < 6$

$$F_T = F_{4.5}\exp\left[3.5\log_e\left(\frac{F_6}{F_{4.5}}\right)\times\log_e\left(\frac{V_T^*}{4.5}\right)\right] \qquad (4\text{-}17)$$

โดยที่ $F_{4.5}$ และ F_6 คือ ค่าของ F_T เมื่อ $V_T^* = 4.5$ และ $V_T^* = 6$ ตามลำดับ

ค่าคงที่ K_T และ λ_T เป็นค่าที่กำหนดรูปร่างของสเปกตรัมของโมเมนต์บิดเนื่องจากลม โดยคำนวณดังนี้

สำหรับ $V_T^* \le 4.5$

$$K_T = \frac{-1.1(D/W)+0.97}{(D/W)^2+0.85(D/W)+3.3}+0.17 \qquad (4\text{-}18)$$

$$\lambda_T = \frac{(D/W)+3.6}{(D/W)^2-5.1(D/W)+9.1}+\frac{0.14}{(D/W)}+0.14 \qquad (4\text{-}19)$$

สำหรับ $6 \le V_T^* \le 10$

$$K_T = \frac{0.077(D/W)-0.16}{(D/W)^2-0.96(D/W)+0.42}+\frac{0.35}{(D/W)}+0.095 \qquad (4\text{-}20)$$

$$\lambda_T = \frac{0.44(D/W)^2-0.0064}{(D/W)^4-0.26(D/W)^2+0.1}+0.2 \qquad (4\text{-}21)$$

L = มิติของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่าระหว่าง W และ D หน่วยเป็น เมตร

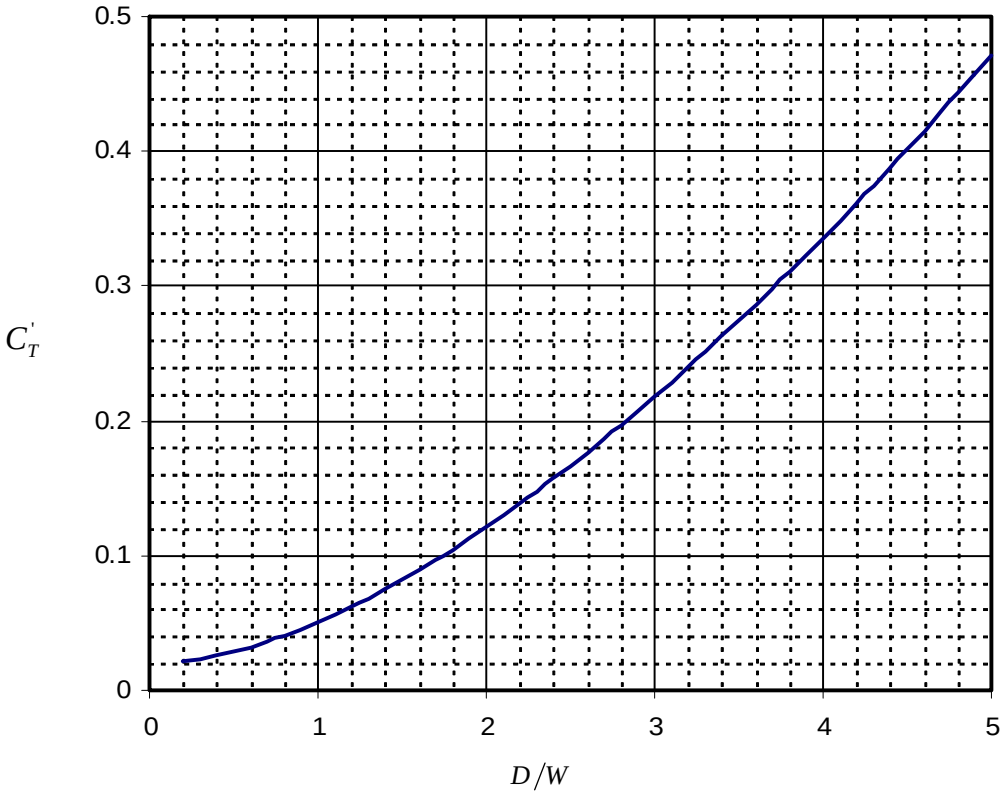
4.5 การรวมผลของแรงลมเนื่องจากแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

ในการออกแบบองค์อาคารเพื่อต้านทานแรงลม ให้พิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดในองค์อาคารจากการพิจารณาผลการรวม แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า ในกรณีดังต่อไปนี้

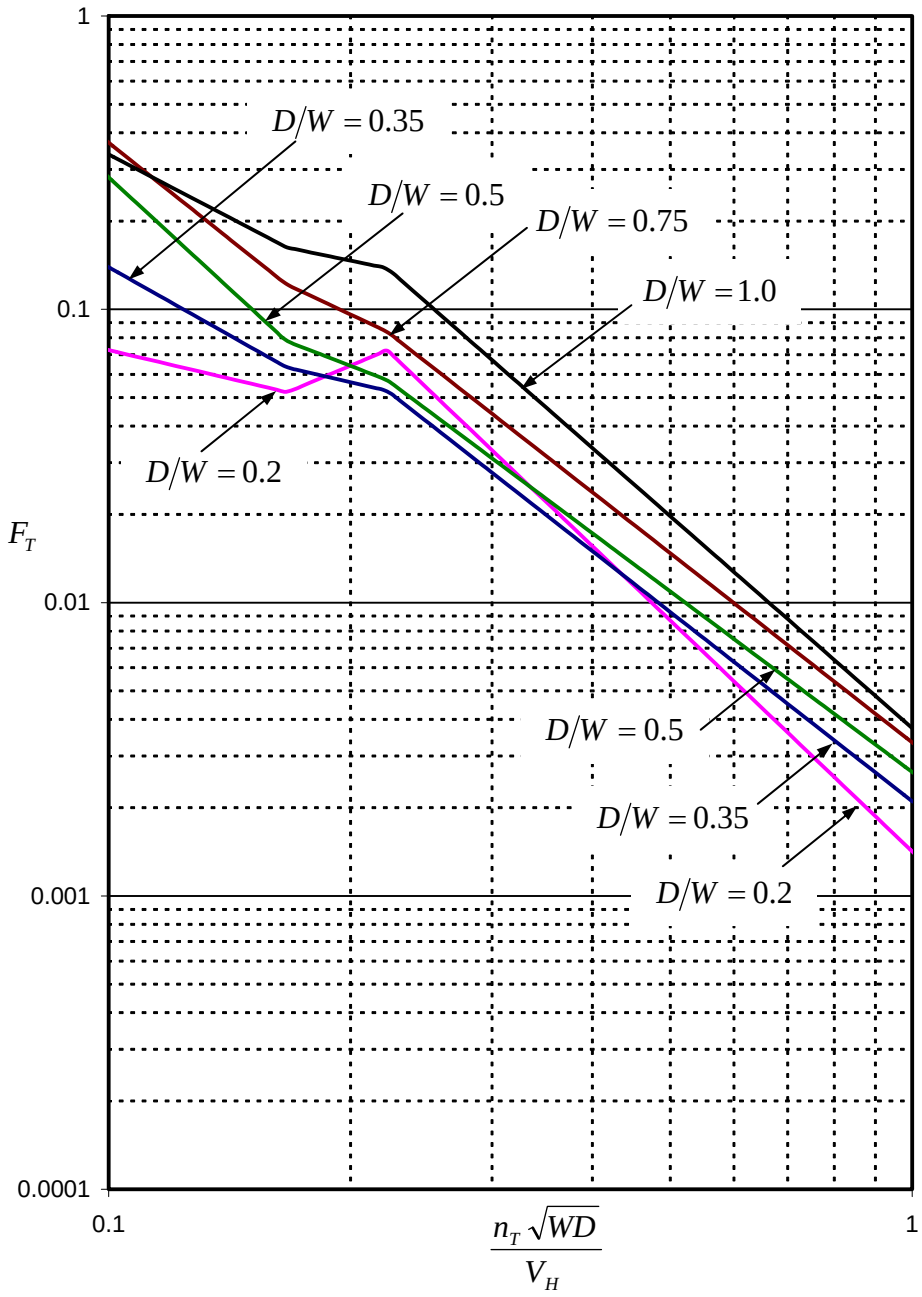
ก. (1.0×แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม) + (0.4×แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม) + (0.4× โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า)

ข. $\left(\left(0.4+\frac{0.6}{C_g}\right)\times\right.$แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม) + (1.0×แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม) + (1.0× โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า)

ในกรณีที่อัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ ไม่เกิน 3 และความสูงของอาคารมากกว่า 80 เมตร ซึ่งไม่ต้องคำนวณแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าโดยตรง ให้ใช้การรวมผลของแรงลมในหัวข้อ 2.8

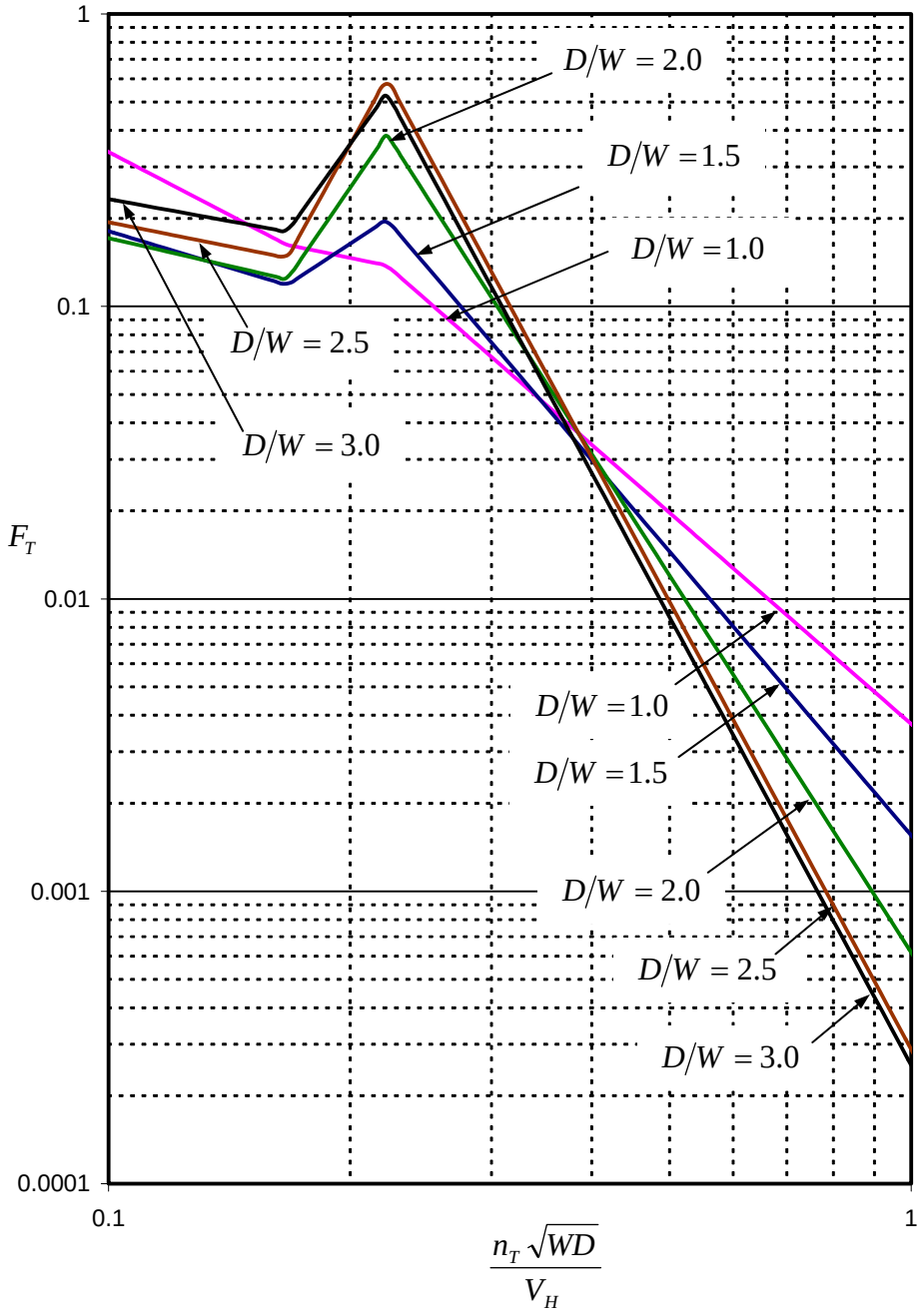


รูปที่ 4.5 สัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์บิด



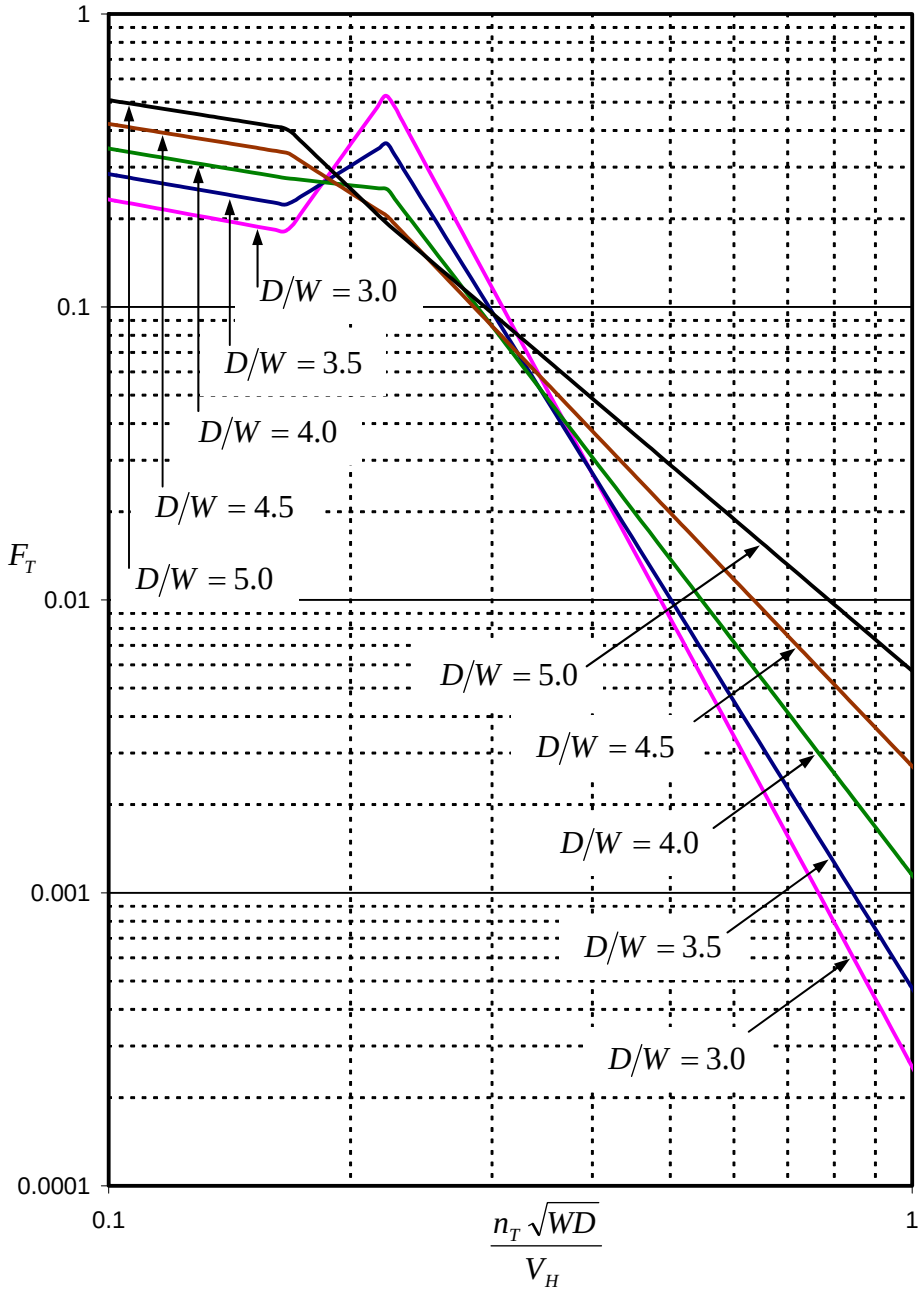
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของแรงลมในแนวบิดของอาคาร

สำหรับ $D/W = 0.2, 0.35, 0.5, 0.75$ และ 1.0



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของแรงลมในแนวบิดของอาคาร

สำหรับ $D/W = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของแรงลมในแนวบิดของอาคาร

สำหรับ $D/W = 3.0, 3.5, 4.0, 4.5$ และ 5.0

บทที่ 5
การทดสอบในอุโมงค์ลม

5.1 ขอบข่ายการใช้งาน

การคำนวณแรงลมโดยวิธีการทดสอบในอุโมงค์ลม ใช้กับอาคารหรือโครงสร้างที่มีความอ่อนไหวต่อแรงลมเป็นพิเศษ และใช้กับอาคารซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตที่ระบุไว้ในมาตรฐานการคำนวณแรงลมตามหัวข้อ 1.1 การทดสอบในอุโมงค์ลมสามารถใช้แทนการคำนวณแรงลมโดยวิธีการอย่างง่าย และวิธีการอย่างละเอียด

5.2 การทดสอบ

การทดสอบในอุโมงค์ลม (หรือการทดสอบโดยใช้ของไหลประเภทอื่น เช่น น้ำ) ที่ใช้เพื่อการคำนวณแรงลมสำหรับออกแบบอาคารและโครงสร้างทุกประเภท ต้องกระทำให้สอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในที่นี้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของแรงลมและความดันลม ต้องกระทำให้สอดคล้องตามข้อกำหนดทุกข้อดังต่อไปนี้

1. การจำลองลมธรรมชาติสำหรับการทดสอบในอุโมงค์ลม ต้องทำการจำลองทั้งคุณสมบัติทางด้านการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง และการแปรเปลี่ยนของลมปั่นป่วนตามความสูง โดยปกติแล้วค่าความเร็วลมเฉลี่ยและความหนาแน่นของลมปั่นป่วนสำหรับลมที่จำลองในอุโมงค์ลม ต้องใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงตามธรรมชาติ
2. ขนาดของลมปั่นป่วนจะต้องได้รับการจำลองอย่างถูกต้อง โดยใช้มาตราส่วนเดียวกันกับที่ใช้ในการจำลองมิติความยาวของอาคาร โดยทั่วไปแล้วขนาดโดยรวมของลมปั่นป่วน (integral length scale of the longitudinal turbulence) ต้องใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงตามธรรมชาติ
3. แบบจำลองอาคารหรือโครงสร้างที่ต้องการทดสอบ ตลอดจนสิ่งปลูกสร้างและสภาพภูมิประเทศโดยรอบ ต้องจำลองให้มีรูปร่างเหมือนจริง และมีความถูกต้องมากที่สุด โดยใช้มาตราส่วนที่เหมาะสม นอกจากนี้รายละเอียดทางด้านสถาปัตยกรรมที่สำคัญ เช่น ระเบียง และแผงกันแดด เป็นต้น ที่มีขนาดตั้งแต่ 1 เมตรขึ้นไป ควรได้รับการจำลองในแบบจำลองอาคารด้วย สำหรับแบบจำลองของสิ่งปลูกสร้างและสภาพภูมิประเทศโดยรอบ ควรจำลองให้มีความถูกต้องสมจริง

4. พื้นที่หน้าตัดบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางลม (projected area) ของอาคารและสิ่งปลูกสร้างโดยรอบทั้งหมดรวมกัน ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 8 ของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม ณ ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ มิเช่นนั้นต้องทำการปรับแก้ผลการทดสอบโดยคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นจากการปิดกั้นของลม นอกจากนี้แบบจำลองอาคารที่ทำการทดสอบควรมีความสูงไม่เกินครึ่งหนึ่งของความสูงอุโมงค์ลม และติดตั้งอยู่ตรงกลางหรือในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดศูนย์กลางของระบบพื้นหมุนภายในอุโมงค์ลม

5. ต้องคำนึงถึงผลที่เกิดจากความแตกต่างของความดันตลอดความยาวของอุโมงค์ลม อันเป็นผลมาจากผนังและเพดานของอุโมงค์ลม

6. ผลกระทบของ Reynolds number ที่มีต่อแรงลมและความดันลมที่วัดได้จากการทดสอบต้องมีน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วการทดสอบควรกระทำที่ค่า Reynolds number ไม่ต่ำกว่า 5×10^4 โดยคำนวณจากด้านที่แคบที่สุดของแบบจำลองและความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดของแบบจำลอง

7. คุณสมบัติของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ร่วมที่ใช้ในการเก็บข้อมูลการทดสอบ ต้องมีประสิทธิภาพที่ดี สามารถวัดค่าแรงหรือความดันพลศาสตร์ที่อยู่ในช่วงความถี่ต่างๆ ตั้งแต่ความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่ที่สูงที่สุดที่จำเป็นต่อการออกแบบในแต่ละกรณี โดยไม่มีความผิดเพี้ยนทั้งในเรื่องของขนาดและการเหลื่อมกันของเวลา (phase distortions) ซึ่งอิทธิพลของการเหลื่อมกันของเวลานี้ จะมีผลกระทบอย่างมากต่อค่าแรงลมลัพธ์ที่เกิดจาก การเฉลี่ยค่าความดันลมที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ บนอาคารหรือองค์อาคารที่ออกแบบ นอกจากนี้ระบบการวัดจะต้องให้ผลการทดสอบที่ปราศจากการรบกวนจากคลื่นเสียง คลื่นไฟฟ้า การสั่นไหวของอุโมงค์ลมและอุปกรณ์ ตลอดจนการแปรปรวณของความดันลมที่เกิดจากการหมุนของใบพัดลม การเปิด-ปิดของประตู และการแปรเปลี่ยนของความดันบรรยากาศ ในบางกรณีอาจจำเป็นต้องมีการปรับแก้ผลที่เกิดเนื่องจากอุณหภูมิด้วย

5.3 การตอบสนองพลศาสตร์

การทดสอบเพื่อหาค่าการตอบสนองพลศาสตร์ของอาคารหรือโครงสร้าง จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในหัวข้อ 5.1 นอกจากนี้ แบบจำลองโครงสร้างและการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะต้องคำนึงถึงการกระจายตัวของมวล สติฟเนส และความหน่วงของอาคารหรือโครงสร้าง

ภาคผนวก ก
แผนที่ความเร็วลมอ้างอิง

คำอธิบายประกอบรูปที่ ก.1 และ ตารางที่ ก-1

ความเร็วลมอ้างอิง ($\overline{V}$) ที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q) ในหัวข้อที่ 2.3.1 กำหนดให้เป็นไปตามสมการ (ก-1) และสมการ (ก-2)

สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน

$$\overline{V} = V_{50} \qquad \text{(ก-1)}$$

สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านกำลัง

$$\overline{V} = T_F \cdot V_{50} \qquad \text{(ก-2)}$$

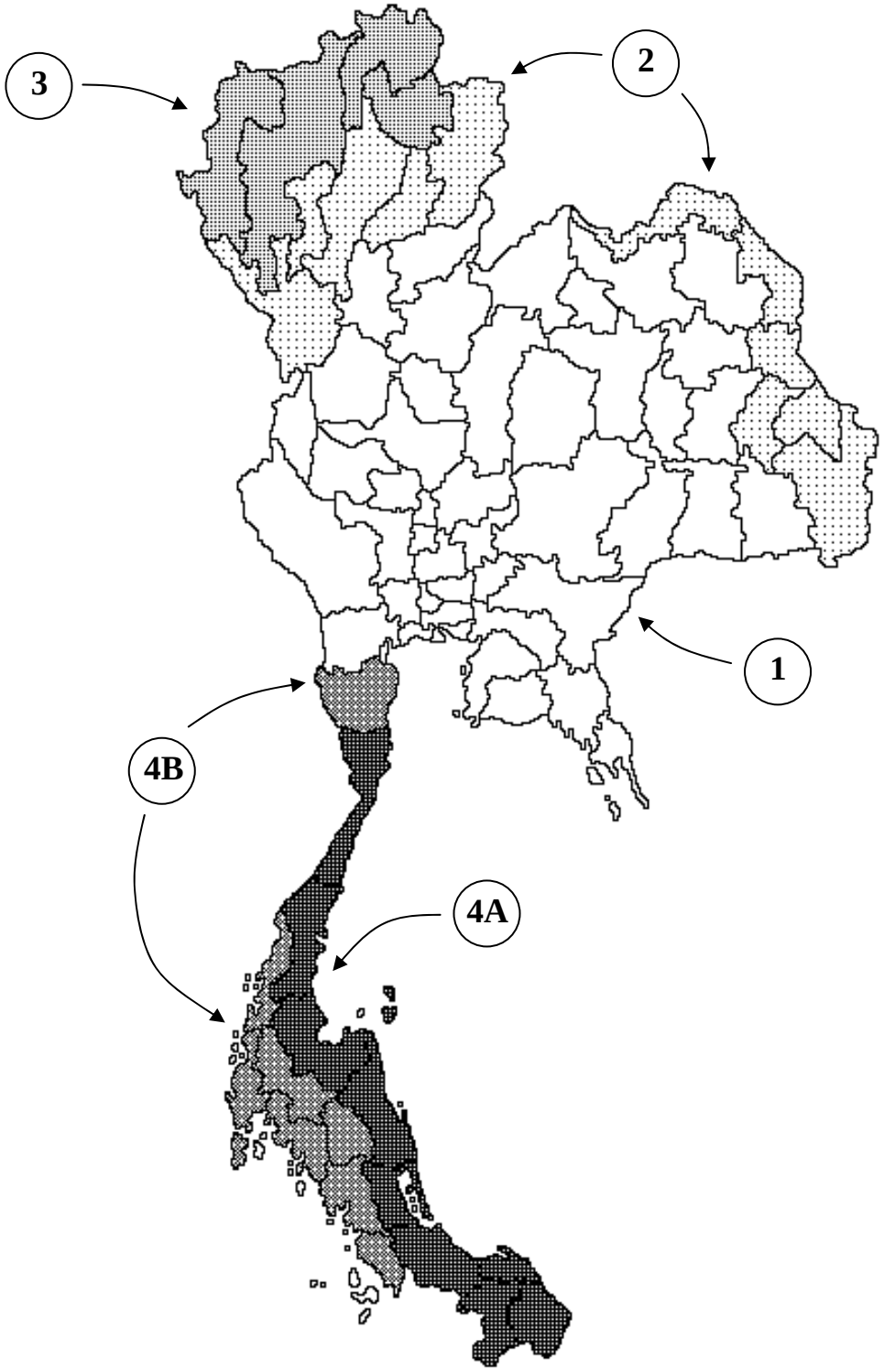
โดย V_{50} คือค่าความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 50 ปี และ T_F คือค่าประกอบไต้ฝุ่น

การจำแนกและการแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงแสดงในรูป ก.1 และตาราง ก-1 กลุ่มความเร็วลมอ้างอิงมีจำนวน 5 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1	V_{50} = 25 เมตร ต่อ วินาที: T_F = 1.0
กลุ่มที่ 2	V_{50} = 27 เมตร ต่อ วินาที: T_F = 1.0
กลุ่มที่ 3	V_{50} = 29 เมตร ต่อ วินาที: T_F = 1.0
กลุ่มที่ 4A	V_{50} = 25 เมตร ต่อ วินาที: T_F = 1.2
กลุ่มที่ 4B	V_{50} = 25 เมตร ต่อ วินาที: T_F = 1.08

รูปที่ ก.1 แสดงอาณาบริเวณโดยสังเขปของแต่ละกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง และตาราง ก-1 จำแนก 76 จังหวัดของประเทศไทยตามกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง โดยแบ่งเป็นตารางย่อยสำหรับแต่ละภาคของประเทศ โดยทั่วไปพื้นที่ทั่วทั้งจังหวัดจะจัดอยู่ในกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงเดียวกัน ยกเว้นจังหวัดตาก จังหวัดนครศรีธรรมราช และ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่มีการแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงตามอำเภอ

หมายเหตุ ค่าประกอบไต้ฝุ่นในสมการ (ก-2) ให้ใช้กับอาคารประเภทความสำคัญสูงมาก (ตารางที่ 2-1) ส่วนอาคารประเภทอื่น การใช้ค่าประกอบดังกล่าวให้เป็นไปตามดุลยพินิจของผู้คำนวณออกแบบโครงสร้าง



รูปที่ ก.1 แผนที่การแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง ($\overline{V}$)

ตารางที่ ก-1 การจำแนกกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง

กลุ่มจังหวัดในภาคเหนือ

จังหวัด	กลุ่มที่
1. กำแพงเพชร	**1**
2. เชียงใหม่	**3**
3. เชียงราย	**3**
4. ตาก	
ก. อำเภออุ้งผาง	**1**
ข. บริเวณอื่นๆ	**2**
5. นครสวรรค์	**1**
6. น่าน	**2**
7. พะเยา	**3**
8. พิจิตร	**1**
9. พิษณุโลก	**1**
10. เพชรบูรณ์	**1**
11. แพร่	**2**
12. แม่ฮ่องสอน	**3**
13. ลำปาง	**2**
14. ลำพูน	**2**
15. สุโขทัย	**1**
16. อุตรดิตถ์	**1**
17. อุทัยธานี	**1**

กลุ่มจังหวัดในภาคตะวันออก

จังหวัด	กลุ่มที่
1. จันทบุรี	**1**
2. ชลบุรี	**1**
3. ตราด	**1**
4. ระยอง	**1**

กลุ่มจังหวัดในภาคกลาง

จังหวัด	กลุ่มที่
1. กรุงเทพมหานคร	**1**
2. กาญจนบุรี	**1**
3. ฉะเชิงเทรา	**1**
4. ชัยนาท	**1**
5. นครนายก	**1**
6. นครปฐม	**1**
7. นนทบุรี	**1**
8. ปราจีนบุรี	**1**
9. ปทุมธานี	**1**
10. ประจวบคีรีขันธ์	**4A**
11. เพชรบุรี	**4B**
12. ราชบุรี	**1**
13. ลพบุรี	**1**
14. สระบุรี	**1**
15. สิงห์บุรี	**1**
16. สุพรรณบุรี	**1**
17. สมุทรปราการ	**1**
18. สมุทรสงคราม	**1**
19. สมุทรสาคร	**1**
20. สระแก้ว	**1**
21. อยุธยา	**1**
22. อ่างทอง	**1**

ตาราง ก-1 การจำแนกกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง (ต่อ)

กลุ่มจังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จังหวัด	กลุ่มที่
1. กาฬสินธุ์	**1**
2. ขอนแก่น	**1**
3. ชัยภูมิ	**1**
4. นครพนม	**2**
5. นครราชสีมา	**1**
6. บุรีรัมย์	**1**
7. มหาสารคาม	**1**
8. มุกดาหาร	**2**
9. ยโสธร	**2**
10. ร้อยเอ็ด	**1**
11. เลย	**1**
12. ศรีสะเกษ	**1**
13. สกลนคร	**1**
14. สุรินทร์	**1**
15. หนองคาย	**2**
16. หนองบัวลำภู	**1**
17. อุดรธานี	**1**
18. อำนาจเจริญ	**2**
19. อุบลราชธานี	**2**

กลุ่มจังหวัดในภาคใต้

จังหวัด	กลุ่มที่
1. กระบี่	**4B**
2. ชุมพร	**4A**
3. ตรัง	**4B**
4. นครศรีธรรมราช ก. อำเภอเมือง อำเภอขนอม อำเภอสิชล อำเภอท่าศาลา อำเภอพิปูน อำเภอพรหมคีรี อำเภอลานสะกา อำเภอร่อนพิบูลย์ อำเภอปากพนัง อำเภอเชียรใหญ่ อำเภอหัวไทร อำเภอชะอวด	**4A**
ข. บริเวณอื่น	**4B**
5. นราธิวาส	**4A**
6. ปัตตานี	**4A**
7. พังงา	**4B**
8. พัทลุง	**4A**
9. ภูเก็ต	**4B**
10. ยะลา	**4A**
11. ระนอง	**4B**
12. สงขลา	**4A**
13. สตูล	**4B**
14. สุราษฎร์ธานี ก. อำเภอเมือง อำเภอท่าชนะ อำเภอไชยา อำเภอท่าฉาง อำเภอคีรีรัฐนิคม อำเภอพุนพิน อำเภอกาญจนดิษฐ์ อำเภอดอนสัก อำเภอบ้านนาเดิม อำเภอบ้านนาสาร อำเภอเกาะสมุย อำเภอเกาะพงัน	**4A**
ข. บริเวณอื่นๆ	**4B**

ภาคผนวก ข
แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม

คำอธิบายสำหรับการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมในภาคผนวก ข. แบ่งออกเป็น 3 หมวด คือ คำอธิบายสำหรับการใช้หน่วยแรงลมภายนอกสำหรับอาคารเตี้ย หน่วยแรงลมสำหรับอาคารสูง และหน่วยแรงลมสำหรับโครงสร้างพิเศษ

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม คือ อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงลม (pressure or suction) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวต่างๆของอาคารกับค่าความดันพลศาสตร์ (dynamic pressure หรือ velocity pressure) ของลมที่เข้ามาปะทะอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์นี้แปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งบนพื้นผิวอาคาร รูปร่างของอาคาร ทิศทางของลม และลักษณะของลมที่เข้ามาปะทะ ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่แสดงในภาคผนวก ข นี้ได้จากการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารในอุโมงค์ลม ซึ่งในหลายกรณีได้มีการตรวจสอบและเทียบผลกับค่าที่วัดได้จากอาคารจริง

ในการออกแบบองค์อาคารจะต้องทำการคำนวณหาค่าพื้นที่รับลมที่มีผลกระทบต่อองค์อาคารที่ออกแบบนั้นเสียก่อน เช่น พื้นที่รับลมสำหรับการออกแบบแปของหลังคามีค่าเท่ากับระยะห่างของแป (spacing) คูณด้วยความยาวของแปแต่ละตัว เป็นต้น พื้นที่ดังกล่าวเรียกว่า พื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area)

ข.1 สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกสำหรับอาคารเตี้ย

1. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่แสดงในรูปที่ ข.1 ถึง ข.8 ใช้สำหรับอาคารที่มีค่า $H/D_s \leq 0.5$ (D_s คือความกว้างของด้านที่แคบที่สุด) และมีความสูงของอาคาร (H) ไม่เกิน 23 เมตร แต่สามารถใช้สำหรับอาคารที่มีค่า $H/D_s < 1$ และความสูงของอาคาร (H) ไม่เกิน 23 เมตร ได้ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลจากแหล่งอื่นที่ดีกว่า สำหรับอาคารที่มีลักษณะนอกเหนือไปจากที่กล่าวข้างต้น ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่แสดงในรูปที่ ข.9

2. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมในรูปที่ ข.1 ถึง ข.8 แสดงในรูปของผลคูณ C_pC_g ซึ่งได้รวมเอาผลเนื่องจากการกระโชกของลมไว้แล้ว หน่วยแรงลมที่คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นหน่วยแรงลมกระโชกสูงสุดที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในช่วงเวลา 1 วินาที

3. การคำนวณค่าหน่วยแรงลมในบางกรณีจำเป็นต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร ในกรณีเช่นนี้ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับ

การออกแบบเป็นผลรวมแบบเวคเตอร์ของหน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายนอกอาคาร และหน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายใน โดยคำนวณได้จากสมการ

$$p_{net} = p + p_i \qquad \text{(ข-1)}$$

โดยที่

$p = I_W q C_e C_g C_p$ คือค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคารตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.2

$p_i = I_W q C_e C_{gi} C_{pi}$ คือค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคารตามที่กำหนดในหัวข้อ 2.2

ทั้งนี้ การคำนวณค่าหน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q) เป็นไปตามข้อกำหนดในหัวข้อ 2.3 การคำนวณค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ C_e เป็นไปตามข้อกำหนดในหัวข้อ 2.4 โดยให้ค่าความสูงของพื้นดิน (z) มีค่าเท่ากับความสูงอ้างอิง (h) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร $C_p C_g$ เป็นไปตามที่กำหนดในภาคผนวก ข. และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายในอาคาร $C_p C_g$ เป็นไปตามที่กำหนดในภาคผนวก ข.

4. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่แสดงในรูปที่ ข.1 ใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักที่รับผนังหลายด้าน เช่น โครงข้อแข็งของอาคารที่รับทั้งหลังคาและผนังภายนอก เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวแสดงลักษณะการกระจายตัวของแรงลม (wind load distribution) ที่ให้ค่าแรงลัพธ์ต่างๆ (horizontal trust, uplift, frame moments) ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง ดังนั้นในการออกแบบจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลของแรงลมที่กระทำแบบบางส่วน (partial loading) ตามข้อกำหนดในหัวข้อ 2.8 ของมาตรฐาน

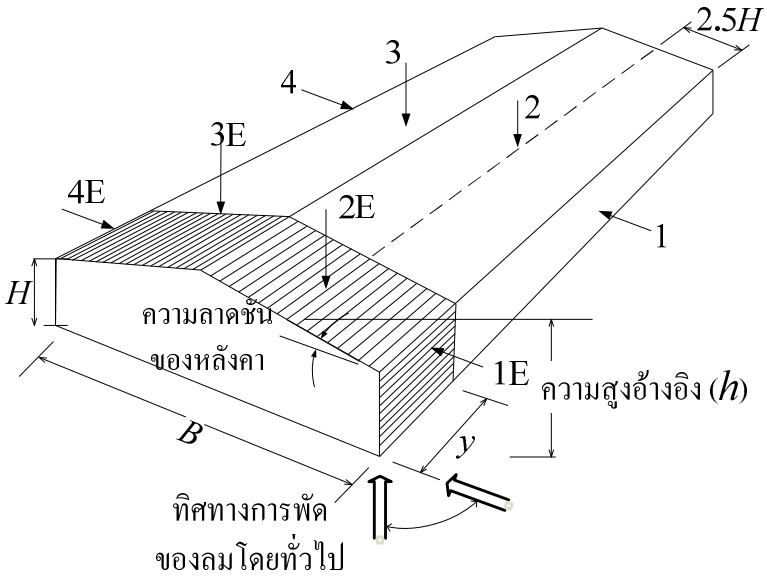
5. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม $C_p C_g$ ที่แสดงในรูปที่ ข.2 ถึง ข.8 ใช้สำหรับออกแบบผนังภายนอกอาคาร หลังคา และชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members) เช่น แปของหลังคา เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักที่แบกรับผนังด้านเดียว เช่น โครงสร้างหลังคาที่มีจุดต่อระหว่างโครงสร้างหลังคากับโครงสร้างส่วนอื่นในลักษณะที่ไม่สามารถถ่ายโมเมนต์ดัดเข้าสู่โครงสร้างส่วนอื่นได้ เป็นต้น

การพิจารณาเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับอาคารเตี้ยและอาคารสูงที่มีลักษณะและรูปร่างต่างๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข-1 การพิจารณาเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับอาคารเตี้ยและอาคารสูง

ประเภทอาคาร	ประเภทของโครงสร้าง	ความลาดชันของหลังคา (α)	หมายเลขของรูป	สัมประสิทธิ์ที่กำหนด
อาคารเตี้ย ที่มีค่า $H/D_s < 1$ และ $H \leq 23$ เมตร	โครงสร้างหลัก	-	ข.1	$C_p C_g$
	กำแพง	-	ข.2	
	หลังคา			
	(1) ทั่วไป	$\alpha \leq 7^o$	ข.3	
	(2) หลังคาลดระดับ	$\alpha = 0^o$	ข.4	
	(3) หลังคาจั่วและปั้นหยา	$\alpha \leq 7^o$	ข.3	
		$\alpha > 7^o$	ข.5	
	(4) หลังคาต่อเนื่อง	$\alpha \leq 10^o$	ข.3	
		$\alpha > 10^o$	ข.6	
	(5) หลังคาลาดชันด้านเดียว	$\alpha \leq 3^o$	ข.3	
		$3^o < \alpha \leq 30^o$	ข.7	
	(6) หลังคารูปร่างฟันเลื่อย	$\alpha \leq 10^o$	ข.3	
		$\alpha > 10^o$	ข.8	
อาคารที่มีค่า $H/D_s \geq 1$ หรือ $H > 23$ เมตร	-	-	ข.9	C_p และ C_p^*

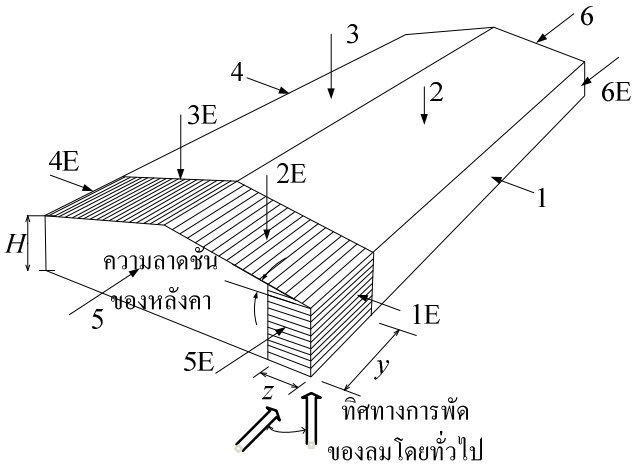
แรงกระทำกรณีที่ 1 ทิศทางการพัดของลมโดยทั่วไป อยู่ในแนวตั้งฉากกับสันหลังคา



ความลาดชันของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร							
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E
0^{o} ถึง 5^{o}	0.75	1.15	-1.3	-2.0	-0.7	-1.0	-0.55	-0.8
20^{o}	1.0	1.5	-1.3	-2.0	-0.9	-1.3	-0.8	-1.2
30^{o} ถึง 45^{o}	1.05	1.3	0.4	0.5	-0.8	-1.0	-0.7	-0.9
90^{o}	1.05	1.3	1.05	1.3	-0.7	-0.9	-0.7	-0.9

รูปที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร C_pC_g สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักโดยคำนึงถึงผลกระทบของแรงลมที่กระทำกับพื้นที่ ผิวทุกด้านของอาคารพร้อมกัน

แรงกระทำกรณีที่ 2 ทิศทางการพัดของลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวขนานกับสันหลังคา



ความลาดชันของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร											
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E	5	5E	6	6E
0^o ถึง 90^o	-0.85	-0.9	-1.3	-2.0	-0.7	-1.0	-0.85	-0.9	0.75	1.15	-0.55	-0.8

รูปที่ ข.1 (ต่อ)

คำอธิบายประกอบรูปที่ ข.1

1. อาคารต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงลมได้ในทุกทิศทาง โดยที่ทั้ง 4 มุมของอาคารต้องได้รับการพิจารณาให้เป็นมุมที่รับแรงลม (windward corner) ตามรูป แรงลมที่กระทำต้องพิจารณาแยกเป็นแรงกระทำกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 เพื่อคำนวณหาค่าแรงกระทำต่างๆรวมทั้งแรงบิดที่เกิดขึ้นกับระบบโครงสร้าง
2. สำหรับหลังคาที่มีองศาความชันเป็นค่าอื่นที่ไม่ได้แสดงไว้ในตาราง ให้เทียบบัญญัติไตรยางค์เพื่อคำนวณหาค่า C_pC_g จากค่าที่แสดงไว้ในตาราง
3. สัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าบวก แสดงถึงแรงกระทำที่พุ่งเข้าและตั้งฉากกับพื้นผิว ส่วนสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าลบแสดงถึงแรงกระทำที่พุ่งออกและตั้งฉากกับพื้นผิว
4. ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 2.6.2 ของมาตรฐานนี้

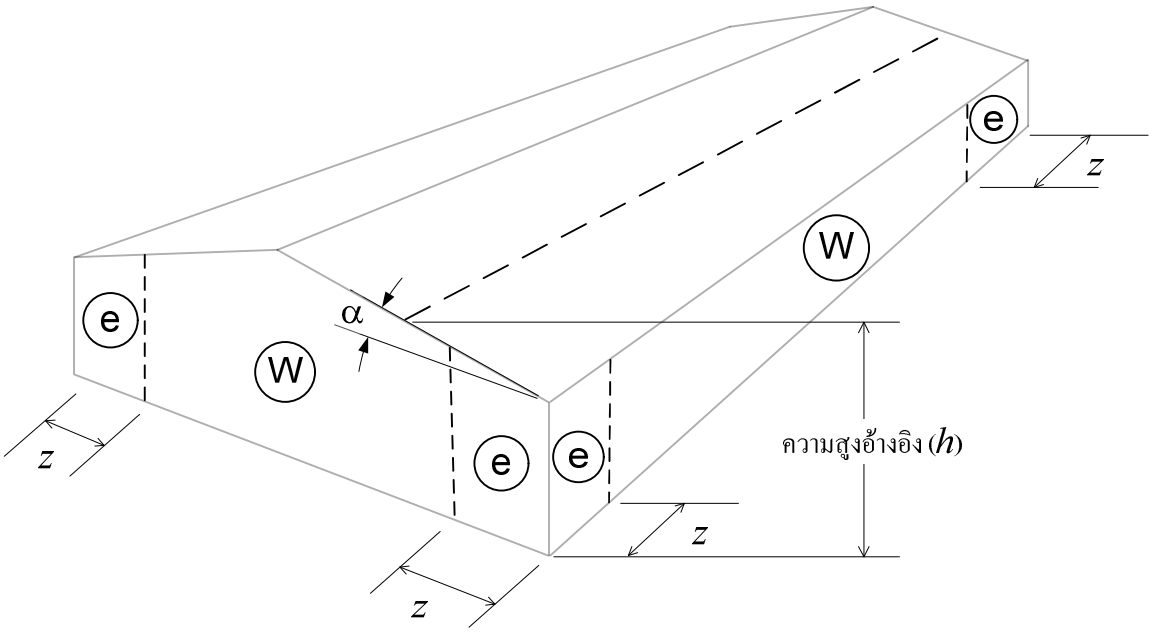
5. สำหรับการออกแบบฐานราก (ยกเว้นส่วนที่ยึดโครงอาคารกับฐานราก (anchorages)) ให้ใช้ค่า 70% ของแรงประสิทธิผล (effective load) ในการออกแบบ

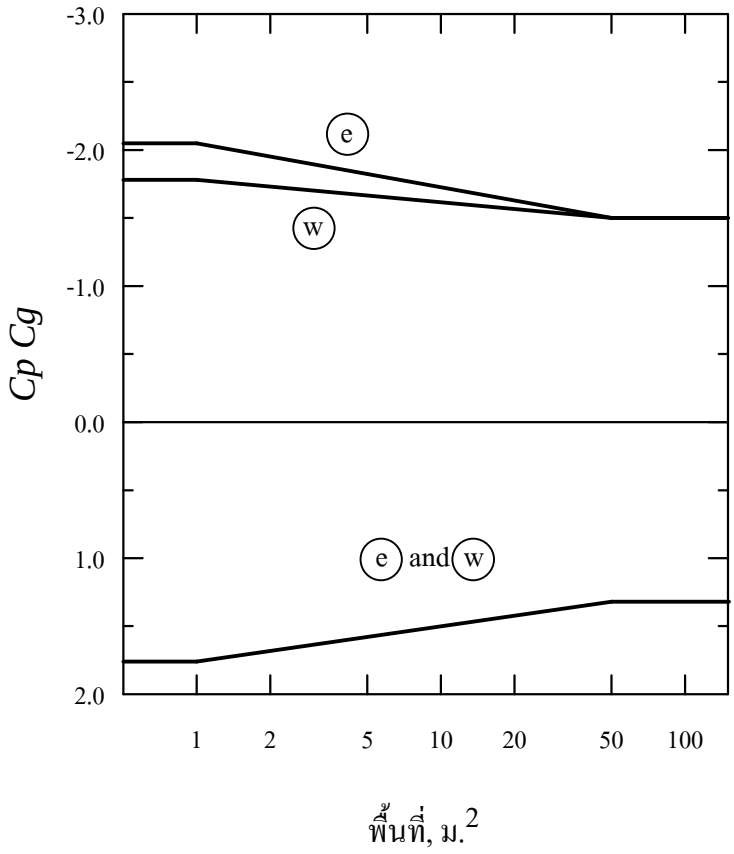
6. ความสูงอ้างอิง, *h*, สำหรับหน่วยแรงลม ให้ใช้ความสูงที่วัดถึงจุดกึ่งกลาง (Mid-height) ของหลังคาทั้งนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 6 เมตร ในกรณีความชันของหลังคาน้อยกว่า 7 องศา สามารถใช้ความสูงของชายคาแทนได้

7. ความกว้าง "z" ของพื้นที่บริเวณขอบของผนังหน้าจั่ว (gable wall) มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10% ของด้านที่แคบที่สุดและ 40% ของความสูง *H* ทั้งนี้ค่า "z" ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุดและไม่น้อยกว่า 1 เมตร

8. ความกว้าง "*y*" ของพื้นที่บริเวณขอบอาคาร (end zone) มีค่าเท่ากับค่าที่มากกว่าระหว่าง 6 เมตร และ 2*z* สำหรับอาคารที่สร้างขึ้นจากโครงข้อแข็ง (Frame) หลายๆตัวมาประกอบกัน ค่า "*y*" อาจจะพิจารณาให้มีค่าเท่ากับระยะที่วัดจากขอบของอาคารถึงโครงข้อแข็งภายในตัวแรก (first interior frame)

9. สำหรับแรงกระทำกรณีที่ 1 ในกรณีที่อาคารที่มีค่า $B/H > 5$ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าลบบนพื้นผิว 2 และ 2E ควรจะใช้กับพื้นที่ที่กว้าง 2.5*H* จากขอบของอาคารด้านต้นลมเท่านั้นสำหรับพื้นส่วนที่เหลือบนพื้นผิว 2 และ 2E สามารถกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กับพื้นผิว 3 และ 3E ตามลำดับ

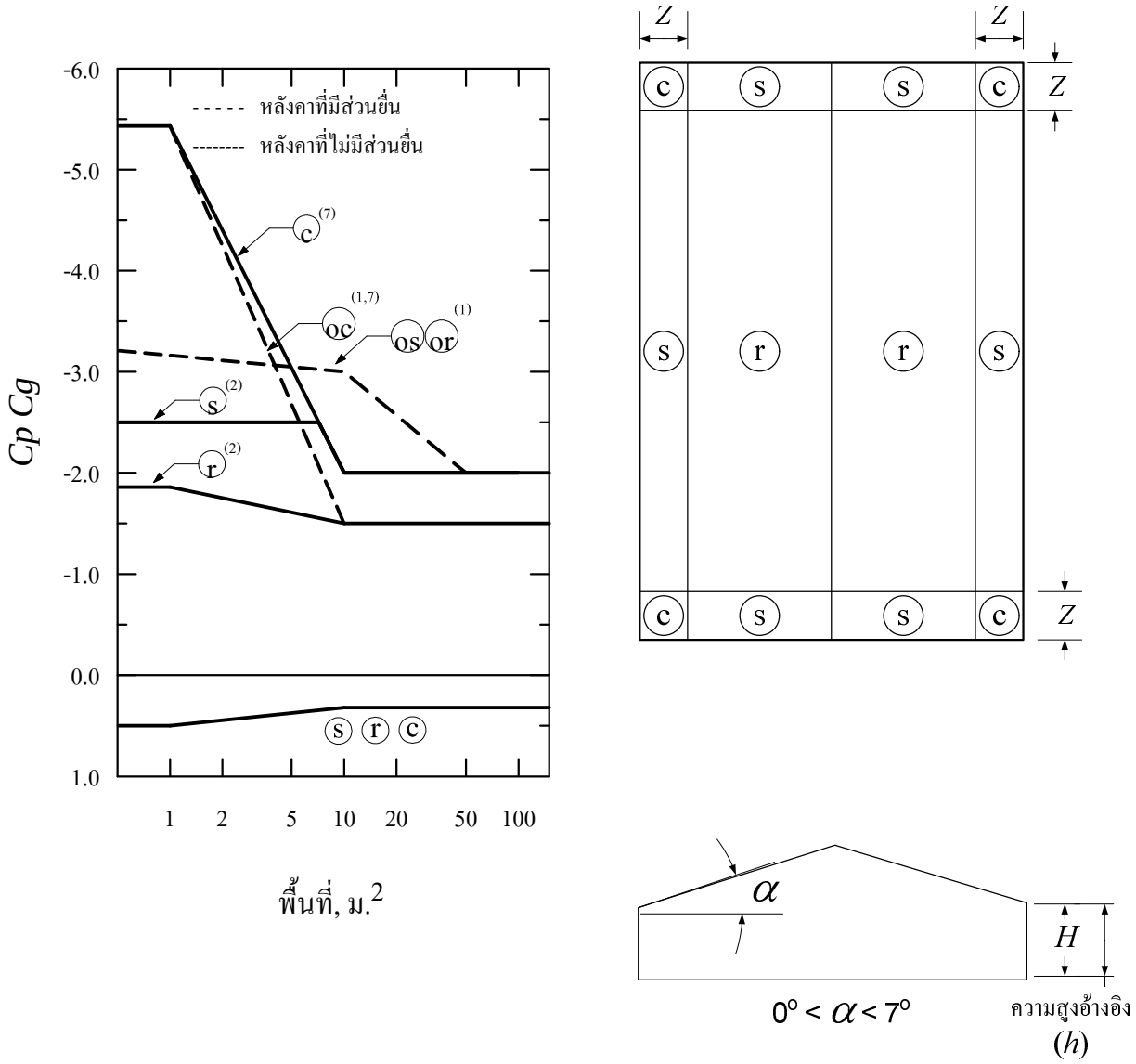




รูปที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร (C_pC_g) สำหรับการออกแบบผนังภายนอกและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members)

คำอธิบายประกอบรูปที่ ข.2

1. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับผนังอาคารในแต่ละโซนมีทั้งค่าบวกและค่าลบดังแสดงในรูป ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวใช้เพื่อการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดันสูงสุดและหน่วยแรงดูดสูงสุดสำหรับการออกแบบโดยพิจารณาถึงผลของแรงลมในทุกทิศทางแล้ว
2. ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆที่แสดงไว้ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลังคาทุกๆ ความชัน
3. ค่าในแกน x ของกราฟที่แสดงในรูปคือพื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area) ในแต่ละโซน
4. ความกว้าง “z” มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10% ของด้านที่แคบที่สุดและ 40% ของความสูง H ทั้งนี้ค่า “z” ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุดและไม่น้อยกว่า 1 เมตร
5. ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 2.6.2 ของมาตรฐานฯ นี้
6. ค่าความสูง, h, สำหรับการคำนวณหน่วยแรงลม ให้ใช้ความสูงที่วัดถึงจุดกึ่งกลาง (mid-height) ของหลังคา แต่ทั้งนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 6 เมตร
7. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าแรงลมสำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารได้ทุกประเภท ยกเว้นในกรณีที่มีครีบแนวดิ่ง (vertical ribs) ที่มีความลึกมากกว่า 1 เมตร ยึดติดอยู่กับระบบผนังภายนอกอาคาร ให้ใช้ค่า C_pC_g = -2.8 กระทำกับโซน e ของอาคาร



รูปที่ ข.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร (C_pC_g) ที่กระทำบนพื้นผิวของหลังคาที่มีค่าความชันน้อยกว่า 7° สำหรับการออกแบบหลังคาและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members)

คำอธิบายประกอบ รูปที่ ข.3

1. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับหลังคาในแต่ละโซนมีทั้งค่าบวกและค่าลบดังแสดงในรูป ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวใช้เพื่อการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดันสูงสุดและหน่วยแรงดูดสูงสุดสำหรับการออกแบบโดยพิจารณาถึงผลของแรงลมในทุกทิศทางแล้ว

2. ในกรณีที่หลังคามีส่วนยื่น (roof with overhang) หน่วยแรงลมลัพธ์ที่กระทำต่อส่วนยื่นจะเป็นผลรวมของ หน่วยแรงลมที่กระทำต่อพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่าง ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมลัพธ์สำหรับส่วนที่ยื่นดังกล่าวแสดงโดยกราฟที่มี สัญลักษณ์ “O” นำหน้า

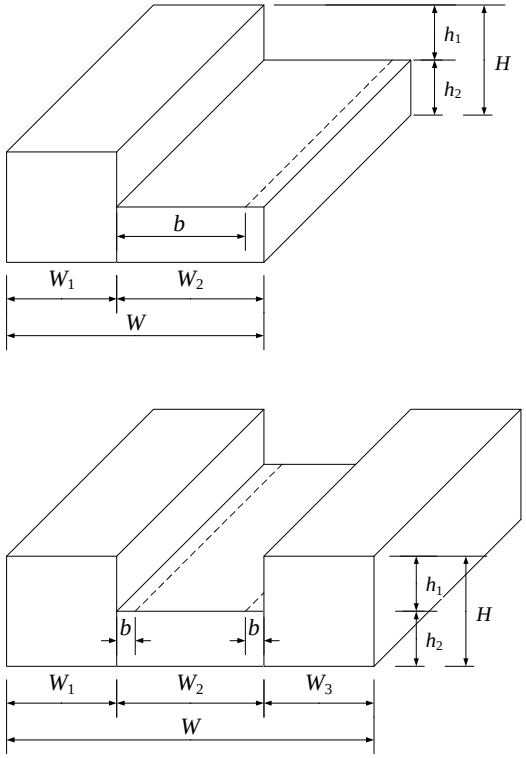
3. ในทุกกรณีไม่ว่าหลังคามีส่วนยื่นหรือไม่มีส่วนยื่น ค่าสัมประสิทธิ์จากกราฟ *s, r* และ *c* เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพื่อใช้คำนวณหน่วยแรงลมที่กระทำต่อพื้นผิวด้านบนของหลังคาในโซน *s, r* และ *c* ตามลำดับ

4. ค่าในแกน x ของกราฟที่แสดงในภาพคือ พื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area) ในแต่ละโซน

5. ความกว้าง “z” มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10% ของด้านที่แคบที่สุดและ 40 % ของความสูง H แต่ทั้งนี้ค่า “ z ” ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุดและไม่น้อยกว่า 1 เมตร

6. ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 2.6.2 ของมาตรฐานฯ นี้

7. สำหรับการออกแบบแรงดูดของหลังคาที่มีพื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบมากกว่า 100 ม.^{2} และมีศูนย์กลางของพื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบห่างจากขอบหลังคามากกว่า $2H$ ให้ลดค่า C_pC_g เหลือเท่ากับ -1.1 ที่ $x/H = 2$ และลดค่าลงเป็นเชิงเส้นเท่ากับ -0.6 ที่ $x/H = 5$ โดยที่ x = ระยะห่างจากขอบหลังคา และ H = ความสูงของหลังคา



รูปที่ ข.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร (C_pC_g) ที่กระทำบนหลังคาลดระดับ (stepped roof) โดยใช้ประกอบกับรูปที่ ข.3 สำหรับการออกแบบหลังคาและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members)

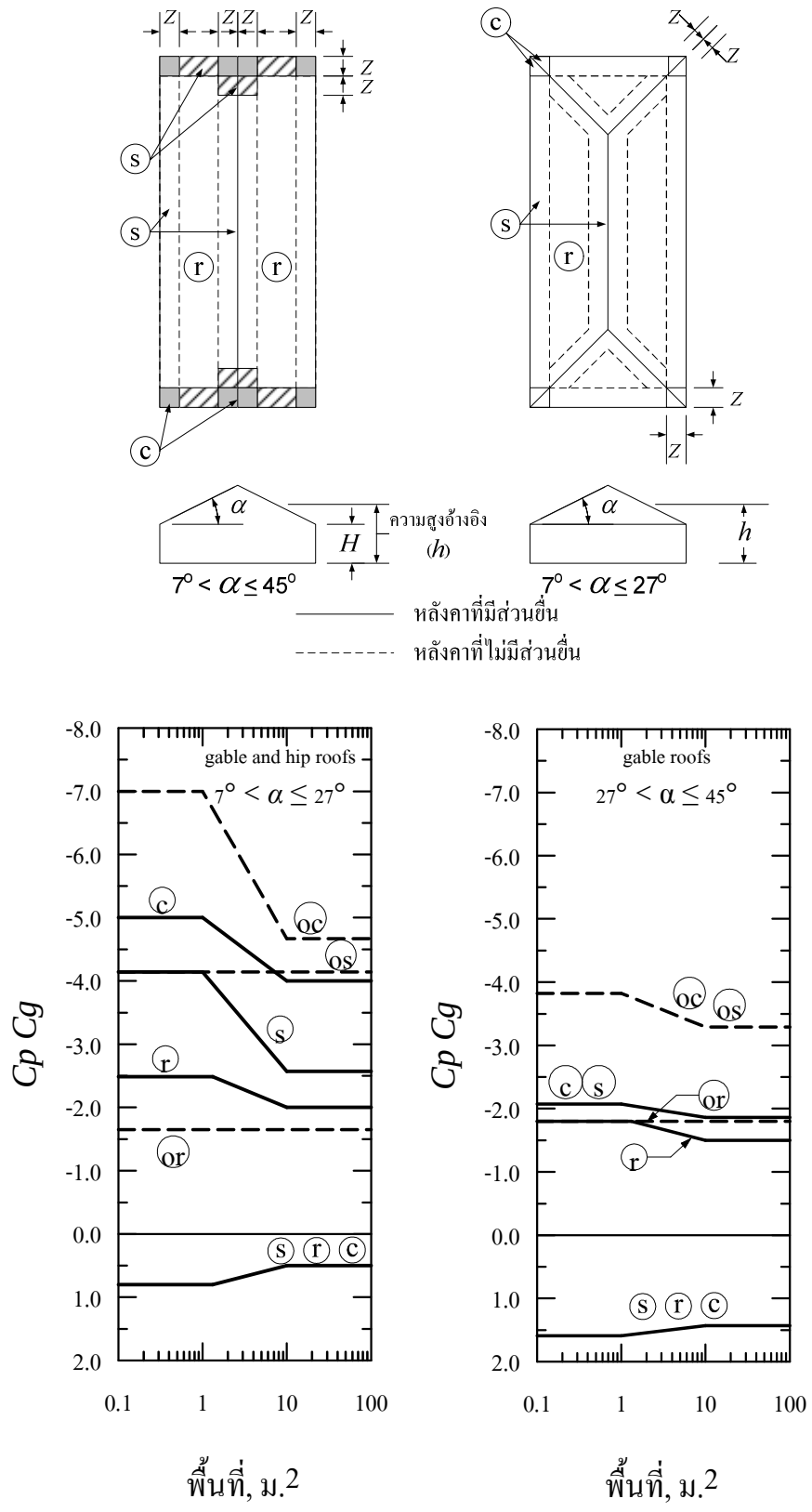
คำอธิบายประกอบ รูปที่ ข.4

1. ค่าสัมประสิทธิ์ C_pC_g สำหรับหลังคาในรูปที่ ข.3 สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับหลังคาลดระดับของอาคารที่แสดงในภาพนี้ได้ ยกเว้นในส่วนของหลังคาลดระดับที่วัดจากกำแพงเป็นระยะ b ซึ่งในส่วนนี้ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเป็นบวกของกำแพงในรูปที่ ข.2
2. ความกว้าง " b " มีค่าเท่ากับ $1.5h_1$ และไม่เกิน 30 เมตร
3. สำหรับพื้นที่กำแพงด้านต่างๆ รวมทั้งกำแพงที่อยู่ติดกับขอบของหลังคาลดระดับ ให้แบ่งโซนและใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมทั้งค่าบวกและค่าลบเท่ากับกำแพงในรูปที่ ข.2
4. รูปที่ ข.4 ใช้ได้กับหลังคาที่มีขนาดและสัดส่วนทางเรขาคณิตที่สอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

$h_1 \geq 3$ เมตร

$h_1 \geq 0.3H$

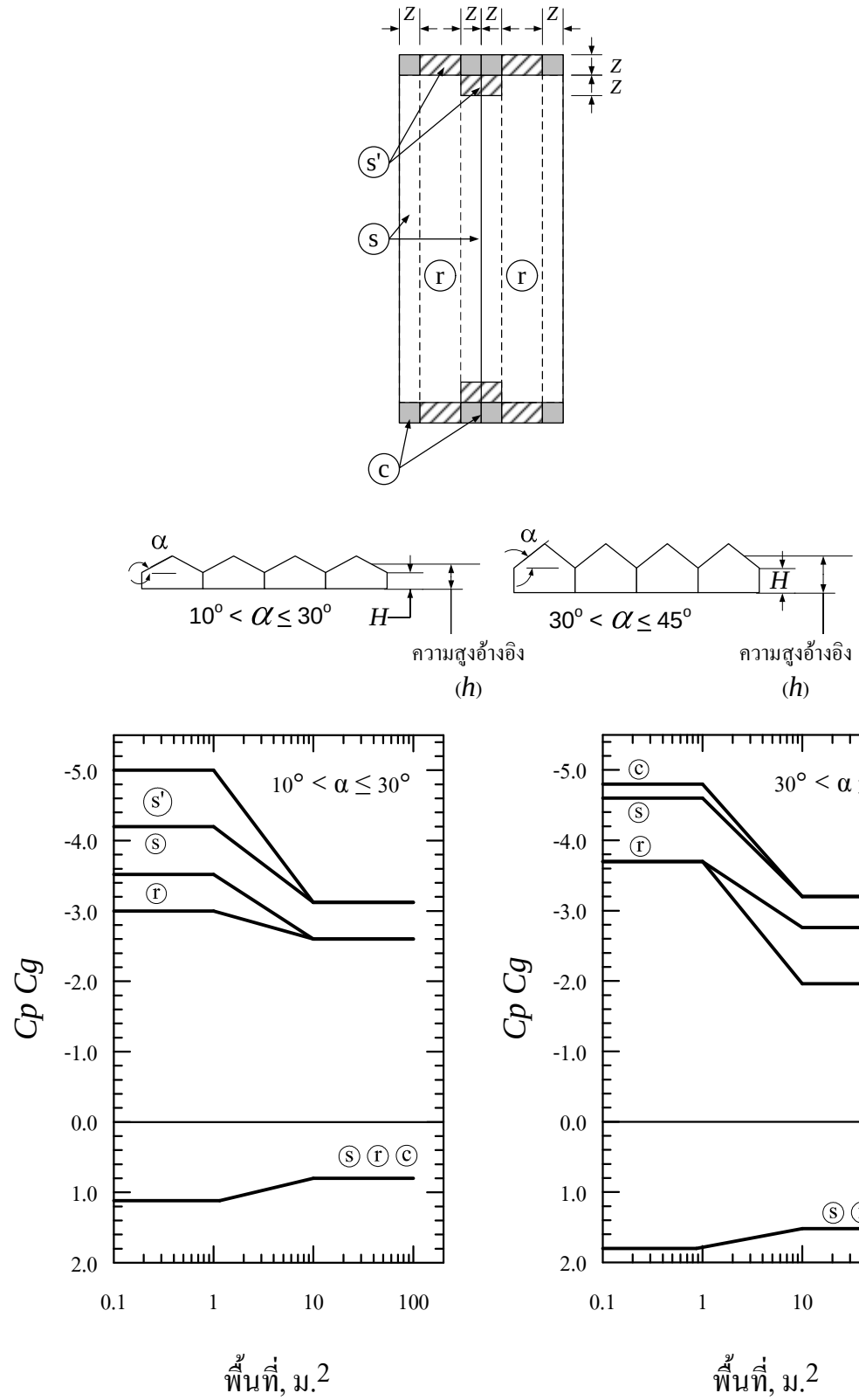
$0.25W \leq (W_1,\ W_2$ และ $W_3) \leq 0.75W$



รูปที่ ข.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร (C_pC_g) ที่กระทำกับหลังคาที่มีความชันมากกว่า 7° สำหรับการออกแบบหลังคาและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members)

คำอธิบายประกอบรูปที่ ข.5

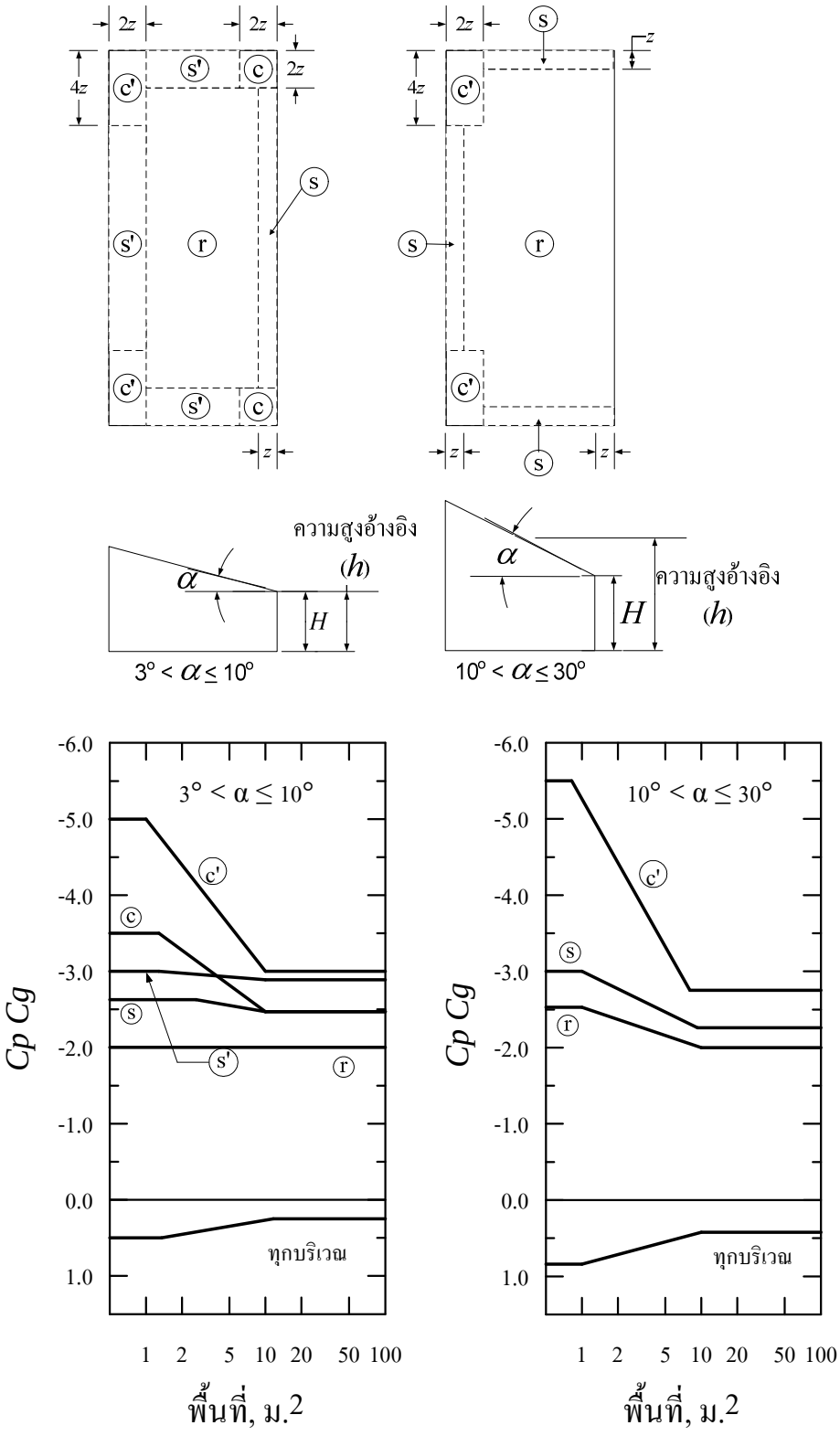
1. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับหลังคาในแต่ละโซนมีทั้งค่าบวกและค่าลบดังแสดงในรูป ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวใช้เพื่อการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดันสูงสุดและหน่วยแรงดูดสูงสุดสำหรับการออกแบบโดยพิจารณาถึงผลของแรงลมในทุกทิศทางแล้ว
2. ในกรณีที่หลังคามีส่วนยื่น (roof with overhang) หน่วยแรงลมลัพธ์ที่กระทำต่อส่วนยื่นจะเป็นผลรวมของ หน่วยแรงลมที่กระทำต่อพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่าง ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมลัพธ์สำหรับส่วนที่ยื่นดังกล่าวแสดงโดยกราฟที่มี สัญลักษณ์ “O” นำหน้า
3. ในทุกกรณีไม่ว่าหลังคามีส่วนยื่นหรือไม่มีส่วนยื่น ค่าสัมประสิทธิ์จากกราฟ s, r และ c เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพื่อใช้คำนวณหน่วยแรงลมที่กระทำต่อพื้นผิวด้านบนของหลังคาในโซน s, r และ c ตามลำดับ
4. ค่าในแกน x ของกราฟที่แสดงในภาพคือ พื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area) ในแต่ละโซน
5. ความกว้าง “z” มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10% ของด้านที่แคบที่สุดและ 40% ของความสูง H แต่ทั้งนี้ค่า “z” ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุดและไม่น้อยกว่า 1 เมตร
6. ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 2.6.2 ของมาตรฐานฯ นี้



รูปที่ ข.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร (C_pC_g) ที่กระทำกับหลังคาที่มีความชันมากกว่า 10^o และมีความต่อเนื่องมากกว่า 1 ช่วงสำหรับการออกแบบหลังคาและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members)

คำอธิบายประกอบรูปที่ ข.6

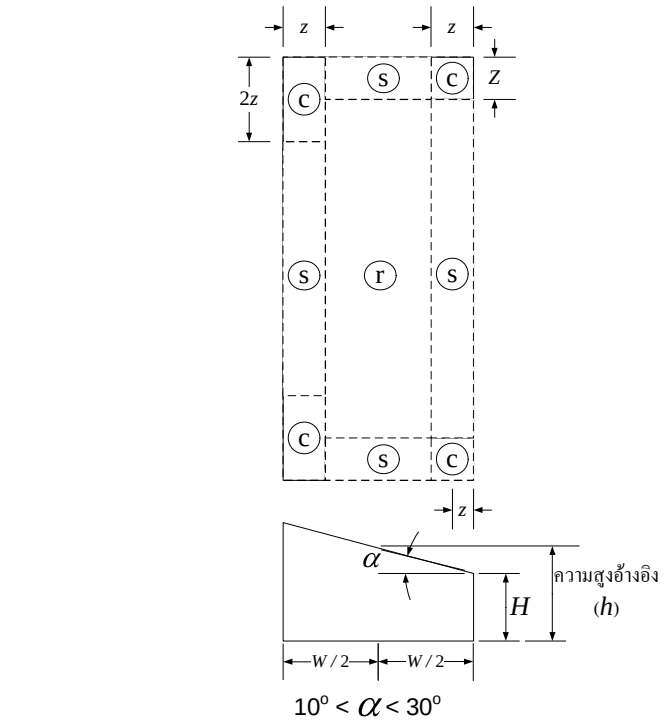
1. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับหลังคาในแต่ละโซนมีทั้งค่าบวกและค่าลบดังแสดงในรูป ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวใช้เพื่อการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดันสูงสุดและหน่วยแรงดูดสูงสุดสำหรับการออกแบบโดยพิจารณาถึงผลของแรงลมในทุกทิศทางแล้ว
2. ค่าในแกน x ของกราฟที่แสดงในรูปคือ พื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area) ในแต่ละโซน
3. ความกว้าง "z" มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10%ของด้านที่แคบที่สุด และ 40%ของความสูง H แต่ทั้งนี้ค่า "z" มีค่าไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุด และไม่น้อยกว่า 1 เมตร
4. ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 2.6.2 ของมาตรฐานฯ นี้
5. สำหรับหลังคาที่มีความชันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{o} ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับหลังคาในรูปที่ ข.3

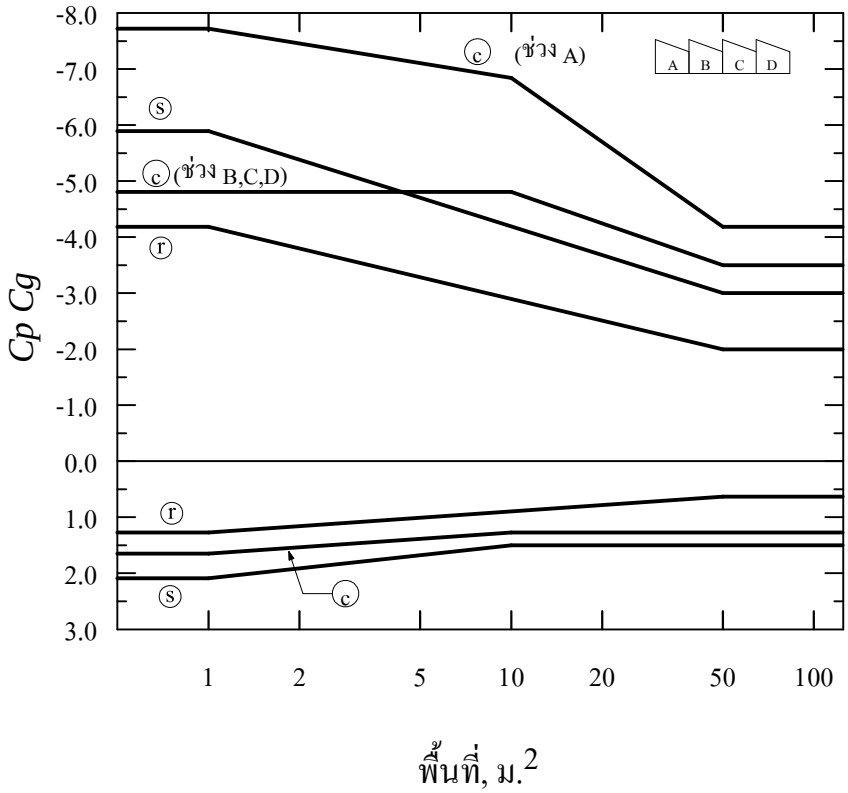


รูปที่ ข.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร (C_pC_g) ที่กระทำกับหลังคาที่มีความลาดชันด้านเดียว สำหรับการออกแบบหลังคาและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members)

คำอธิบายประกอบ รูปที่ ข.7

1. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับหลังคาในแต่ละโซนมีทั้งค่าบวกและค่าลบดังแสดงในรูป ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวใช้เพื่อการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดันสูงสุดและหน่วยแรงดูดสูงสุดสำหรับการออกแบบโดยพิจารณาถึงผลของแรงลมในทุกทิศทางแล้ว
2. ค่าในแกน x ของกราฟที่แสดงในรูปคือ พื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area) ในแต่ละโซน
3. ความกว้าง "z" มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10%ของด้านที่แคบที่สุด และ 40%ของความสูง H แต่ทั้งนี้ค่า "z" มีค่าไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุด และไม่น้อยกว่า 1 เมตร
4. ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ หัวข้อ 2.6.2 ของมาตรฐานฯ นี้
5. ค่าสัมประสิทธิ์ C_pC_g ที่แสดงในรูปใช้ได้กับหลังคาที่มีค่าความชันไม่น้อย 3^o ส่วนหลังคาที่มีค่าความชันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3^o ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงในรูปที่ ข.3





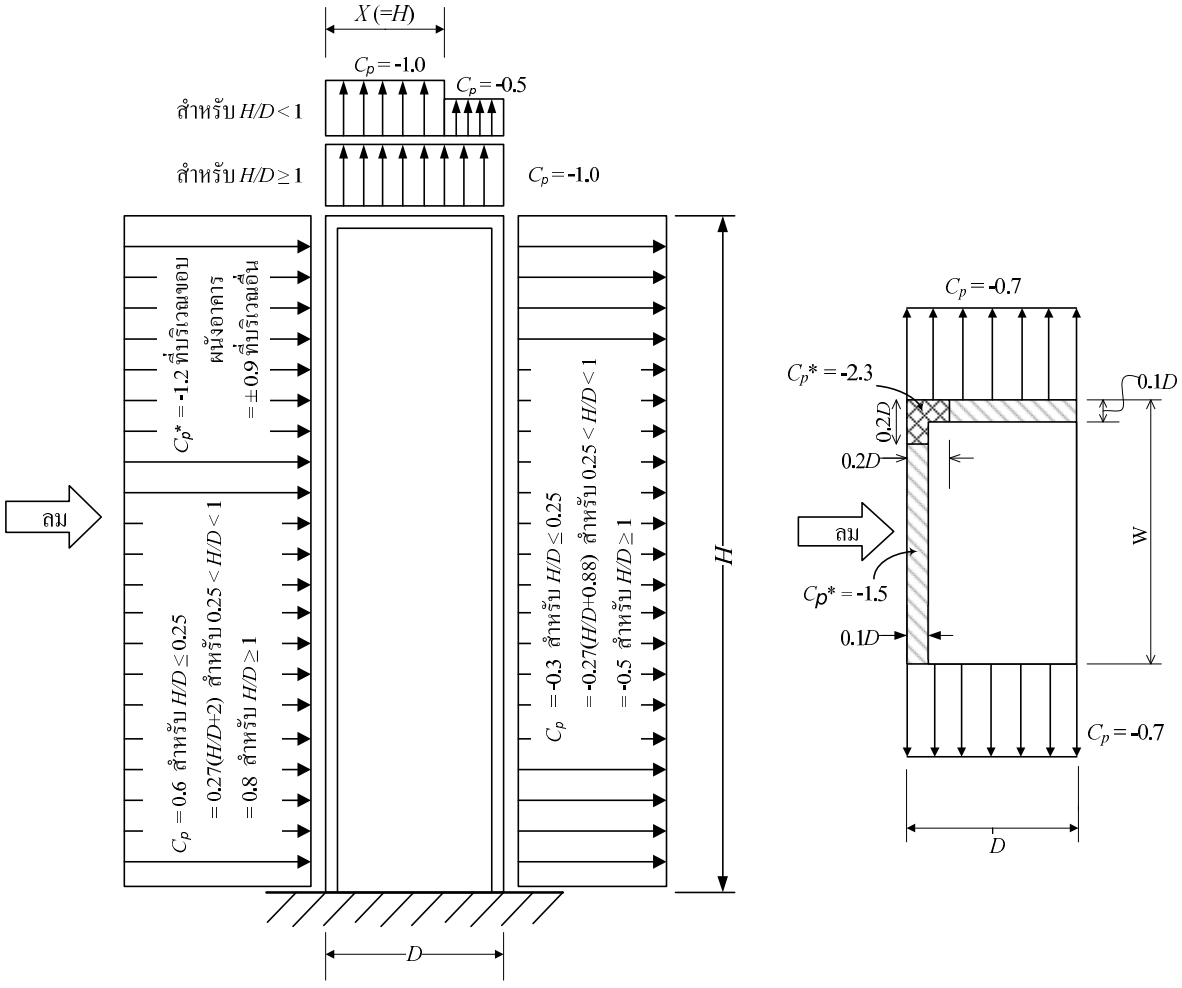
รูปที่ ข.8 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร (C_pC_g) ที่กระทำกับหลังคาลักษณะฟันเลื่อย (มีความลาดชันเพียงด้านเดียว และมีความต่อเนื่องมากกว่า 1 ช่วง) ที่มีความชันมากกว่า 10^o สำหรับการออกแบบหลังคาและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural members)

คำอธิบายประกอบ รูปที่ ข.8

1. ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับหลังคาในแต่ละโซนมีทั้งค่าบวกและค่าลบดังแสดงในรูป ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวใช้เพื่อการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดันสูงสุดและหน่วยแรงดูดสูงสุดสำหรับการออกแบบโดยพิจารณาถึงผลของแรงลมในทุกทิศทางแล้ว
2. ค่าในแกน x ของกราฟที่แสดงในรูปคือ พื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area) ในแต่ละโซน
3. ความกว้าง "z" มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10%ของด้านที่แคบที่สุด และ 40%ของความสูง H แต่ทั้งนี้ค่า"z" มีค่าไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุด และไม่น้อยกว่า 1 เมตร
4. ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ หัวข้อ 2.6.2 ของมาตรฐานฯ นี้
5. สำหรับพื้นที่บริเวณมุมของหลังคาค่าสัมประสิทธิ์ C_pC_g ที่เป็นค่าลบสำหรับที่อยู่ในช่วง A จะแตกต่างจากค่า สัมประสิทธิ์ C_pC_g ของช่วง B, C และ D
6. สำหรับหลังคาที่มีความชันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{o} ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับหลังคาในรูปที่ ข.3

ข.2 สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกสำหรับอาคารสูง

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่แสดงในรูปที่ ข.9 ใช้สำหรับอาคารที่มีค่า $H/D_s \geq 1$ และความสูงของอาคาร (H) มากกว่า 23 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปของค่า C_p (หน่วยแรงลมเฉลี่ยของพื้นผิว) และ C_p^* (หน่วยแรงลมเฉพาะที่) ซึ่งไม่ได้รวมผลเนื่องจากการกระโชกของลม ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องคำนวณหาค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (C_g) ตามข้อกำหนดในหัวข้อ 2.5



รูปหน้าตัดด้านข้างของอาคาร รูปด้านบนของอาคาร

รูปที่ ข.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p และ C_p^*) สำหรับอาคารที่มีความสูงมากกว่าความกว้าง และมีหลังคาอยู่ในแนวราบ

คำอธิบายประกอบ รูปที่ ข.9

1. กรณีที่ทิศทางลมอยู่ในแนวตั้งฉากกับผนังด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร ให้ถือว่ามิติในแนวราบของอาคารในแนวขนานกับทิศทางลม คือความลึก (D) ของอาคาร และมิติในแนวราบด้านที่ตั้งฉากกับทิศทางลมเป็นความกว้าง (W) ของอาคาร
2. การคำนวณค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารโดยรวม ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ C_p สำหรับหลังคาและผนังแต่ละด้านให้เหมาะสมตามที่แสดงในรูปที่ ข.9
3. ในกรณีที่ลมกระทำในทิศทางที่ไม่อยู่ในแนวตั้งฉากกับผนังอาคาร จะทำให้เกิดแรงดูดเฉพาะที่อย่างสูงบนพื้นผิวด้านต่างๆของอาคาร ซึ่งในการออกแบบผนังภายนอกที่มีขนาดเล็ก (ประมาณขนาดของหน้าต่าง) บนผนังและพื้นผิวหลังคาของอาคาร ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉพาะที่ (C_P^*) ในการคำนวณค่าแรงดูดดังกล่าว แต่ไม่ต้องนำค่า C_p^* มาใช้ร่วมกับค่า C_p สำหรับการคำนวณแรงลมที่กระทำกับอาคารโดยรวม
4. ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 2.6.2 ของมาตรฐานฯ นี้
5. ความสูงอ้างอิงเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) กำหนดให้ใช้ดังต่อไปนี้
   - สำหรับการคำนวณค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคารบนผนังด้านต้นลม (windward walls) ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = z (ความสูงเหนือพื้นดิน)
   - สำหรับการคำนวณค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคารบนหลังคาและพื้นผิวด้านข้างของอาคาร (roof and side walls) ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = H (ความสูงทั้งหมดของอาคาร)
   - สำหรับการคำนวณค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคารบนผนังด้านท้ายลม (leeward walls) ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = $0.5H$
   - กรณีใช้ร่วมกับ C_p* เพื่อหาค่าหน่วยแรงดูดเฉพาะที่ ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = H
   - สำหรับการคำนวณค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร (internal pressures) ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = $0.5H$
   - สำหรับการคำนวณค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคารที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ให้ใช้ความสูงอ้างอิง เท่ากับความสูงของช่องเปิดนั้นวัดเหนือพื้นดิน

6. สำหรับพื้นที่ขอบของผนังอาคาร ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉพาะที่ (C_p^*) เท่ากับ -1.2 กระทำกับพื้นที่ที่กว้าง $0.1D$ จากขอบของอาคาร ยกเว้นผนังภายนอกที่ประกอบด้วยครีบขนาดใหญ่ในแนวดิ่งที่มีความลึกมากกว่า 1 เมตร ให้ใช้ค่า C_p^* = -1.4 เพื่อคำนวณค่าแรงลมเฉพาะที่ที่กระทำกับพื้นที่บริเวณขอบของอาคารที่กว้างเท่ากับ $0.2D$ จากขอบของอาคาร

ข.3 สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสำหรับโครงสร้างพิเศษ

1. รูปที่ ข.10 ถึง ข.18 ให้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม และสัมประสิทธิ์ของแรงลมลัพธ์ สำหรับการออกแบบโครงสร้างที่แตกต่างกันหลายลักษณะ ข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงข้อแนะนำโดยทั่วไปสำหรับการคำนวณแรงลม เนื่องจากเป็นผลการศึกษาที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม ภายใต้สภาพลมที่มีความแปรปรวนแตกต่างไปจากลมตามธรรมชาติ นอกจากนี้ข้อมูลสำหรับโครงสร้างบางประเภท มิได้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม แต่อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ของแรงลมลัพธ์ ดังนั้นผู้ใช้งานจึงควรศึกษาสัญลักษณ์ ตลอดจนสมการที่เกี่ยวข้องให้เข้าใจอย่างถ่องแท้ ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง
2. การคำนวณค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) และค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (C_g) สามารถคำนวณได้ตามข้อกำหนดของวิธีการอย่างง่าย หรือวิธีการอย่างละเอียด ตามความเหมาะสมของแต่ละกรณี
3. แรงลมที่กระทำต่อชิ้นส่วนของโครงสร้าง (structural members) ที่มีหน้าตัดลักษณะต่างๆ ตลอดจนโครงสร้างที่ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนเหล่านั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้รูปที่ ข. 15 ถึง ข.18 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีสัญลักษณ์ ∞ กำกับในรูป กำหนดให้ใช้กับชิ้นส่วนที่มีความยาวไม่จำกัด (infinite length) ในกรณีของชิ้นส่วนที่มีความยาวที่จำกัด (finite length) จะต้องนำค่า k (reduction factor) ที่กำหนดในรูปมาคูณกับค่าสัมประสิทธ์ดังกล่าว เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่แท้จริงสำหรับชิ้นส่วนนั้น ทั้งนี้ให้คำนวณหาค่าความชะลูดของชิ้นส่วนโดยใช้ค่าความยาว (l) ดังต่อไปนี้
    - l = ความยาวของชิ้นส่วน ในกรณีของคานช่วงเดียวและคานต่อเนื่อง
    - l = สองเท่าของความยาวของชิ้นส่วน ในกรณีของคานยื่น
    - $l = \infty$ ในกรณีของคานที่มีการยึดแน่นทั้งสองปลาย (fixed ends)

4. ชิ้นส่วนที่มีแนวการวางตัวที่ขนานกัน อาจจะมีการบดบังของลม (shielding effects) เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่อยู่ท้ายลม ในกรณีดังกล่าวสามารถใช้ค่าหน่วยแรงลมอ้างอิงที่ลดลง (q_x) ตามรูปที่ ข.17 กระทำกับชิ้นส่วนที่ได้รับผลเนื่องการบดบังของลมดังกล่าว

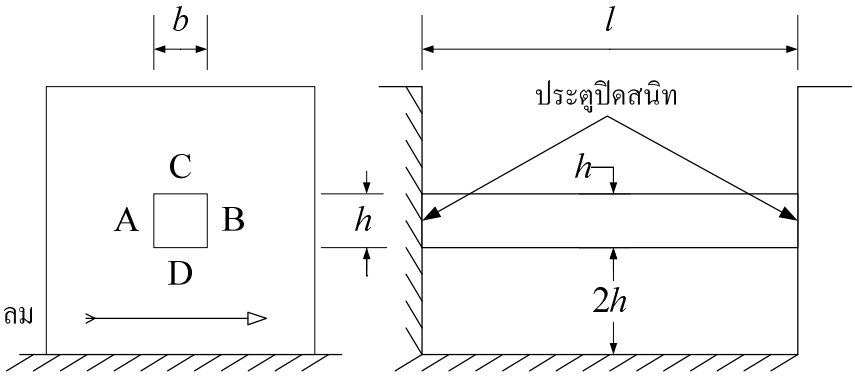
5. รูปร่างของโครงสร้างอาจมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงของการประกอบและติดตั้งชิ้นส่วน ซึ่งอาจส่งผลให้แรงลมที่กระทำกับโครงสร้างชั่วคราวในระหว่างการประกอบและติดตั้งนี้ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างเมื่อแล้วเสร็จ ดังนั้นจึงควรทำการตรวจสอบค่าแรงลมที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างชั่วคราวนี้ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมในรูปที่ ข.1 ถึง ข.18

6. ชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม จะให้ผลของการบดบังลมแตกต่างไปจากชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดเป็นรูปเหลี่ยมประเภทอื่น ทั้งนี้ในกรณีของหน้าตัดวงกลมที่มีค่า $d\sqrt{qC_e} < 0.167$ และ $A_s / A > 0.3$ สามารถใช้สมการและค่าสัมประสิทธิ์ในรูปที่ ข.14 เพื่อประมาณค่าแรงลมที่กระทำกับชิ้นส่วนโดยไม่ต้องพิจารณาผลของการบดบังลม ในกรณีของหน้าตัดวงกลมที่มีค่า $d\sqrt{qC_e} \geq 0.167$ ผลของการบดบังลมยังมีค่าไม่มากนักซึ่งอาจจะไม่ต้องคิดผลของการบดบังลมที่มีต่อชิ้นส่วนที่อยู่ท้ายลม แต่ในกรณีของหน้าตัดวงกลมที่มีค่า $A_s / A \leq 0.3$ อาจพิจารณาใช้ค่าคงที่ k_x = 0.9 สำหรับคำนวณค่าการบดบังของแรงลม

7. โครงสร้างที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม ค่าความดันลมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางลมจะแปรเปลี่ยนไปตามความเร็วลม และค่า Reynolds number ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่แสดงในรูปที่ ข.12, ข.13, ข.14 และ ข.18 ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับค่า $d\sqrt{qC_e}$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงค่า Reynolds number ซึ่งการแปลงค่า $d\sqrt{qC_e}$ ให้เป็นค่า Reynolds number สามารถทำได้โดยนำค่าคงที่ 2.7×10^6 มาคูณกับ $d\sqrt{qC_e}$ โดยใช้หน่วยของ d เป็นเมตร และ q เป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร

8. โครงสร้างที่มีพื้นผิวโค้งหรือมีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม ความขรุขระของพื้นผิวถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการคำนวณค่าแรงลม เนื่องจากมีผลต่อค่า Reynolds number ในรูปที่ ข.12 ได้กำหนดให้พื้นผิวที่ทำจากโลหะ คอนกรีต ไม้ และกำแพงก่ออิฐผิวเรียบ มีค่าความขรุขระปานกลาง (moderately smooth) ส่วนพื้นผิวที่มีครีบขนาดใหญ่กว่า 2% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าตัดโครงสร้าง ถือว่ามีความขรุขระมาก (very rough) ในกรณีที่ไม่สามารถประมาณขนาดของความขรุขระได้ ควรเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่ามากเพื่อความปลอดภัยต่อโครงสร้าง

อัตราส่วน $h : b : l = 1 : 1 : 10$



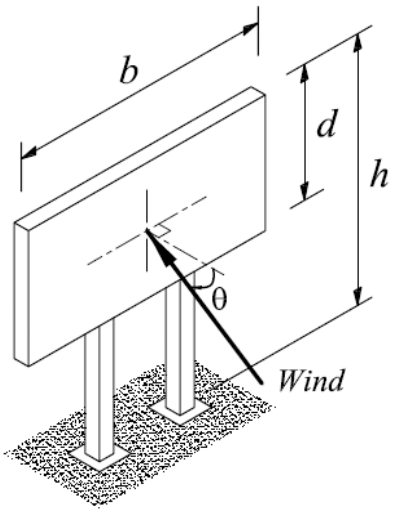
ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร (C_P)

ทิศทางลม (ϕ)	ผนังด้านที่กำลังพิจารณา			
	A	B	C	D
0^o	+0.8	-1.2	-1.4	-1.5

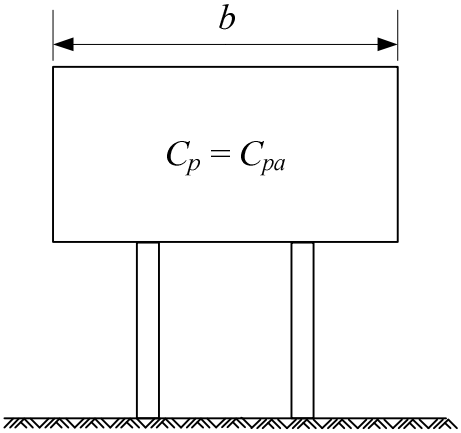
ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายในอาคาร (C_{pi})

ลักษณะและตำแหน่งของช่องเปิด	ทิศทางลม $\phi = 0°$
กระจายสม่ำเสมออยู่บนทั้งสี่ด้าน	-0.5
ช่องเปิดส่วนใหญ่อยู่บนด้าน A	+0.7
ช่องเปิดส่วนใหญ่อยู่บนด้าน B	-1.1
ช่องเปิดส่วนใหญ่อยู่บนด้าน C	-1.3

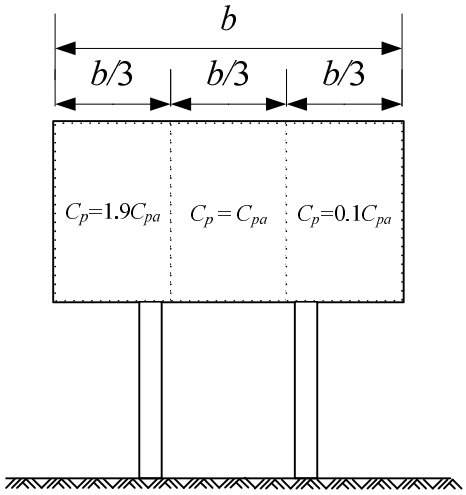
รูปที่ ข.10 ทางเดินเชื่อมระหว่างอาคาร



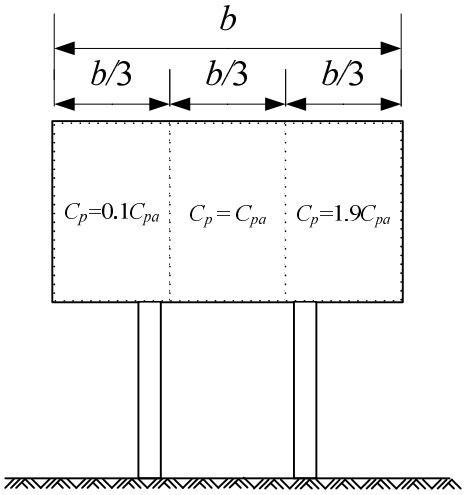
ก. สัดส่วนรูปร่างของป้าย และทิศทางลม (θ)



ข. ค่าสัมประสิทธิ์ C_p ในกรณีที่ทิศทางลมตั้งฉากกับแผ่นป้าย ($\theta = 0$)



ค. ค่าสัมประสิทธิ์ C_p ในกรณีขอบด้านซ้ายของป้ายชี้เข้าหาลม ($\theta = +45°$)



ง. ค่าสัมประสิทธิ์ C_p ในกรณีขอบด้านขวาของป้ายชี้เข้าหาลม ($\theta = -45°$)

รูปที่ ข.11 ป้ายและกำแพง

ตารางที่ ข-1 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย C_{pa}

อัตราส่วน	อัตราส่วน b/d							
d/h	≤ 0.1	0.2	0.5	1	2	3	4	≥ 5
≤ 0.2	1.65	1.60	1.60	1.55	1.55	1.55	1.60	1.60
0.3	1.65	1.60	1.55	1.55	1.50	1.50	1.55	1.55
0.5	1.65	1.55	1.50	1.50	1.45	1.45	1.45	1.45
0.7	1.60	1.50	1.45	1.40	1.35	1.35	1.35	1.30
0.9	1.60	1.45	1.35	1.30	1.25	1.25	1.25	1.25
1.0 *	1.55	1.40	1.30	1.25	1.20	1.20	1.15	1.15

* กรณีของกำแพง หรือป้ายที่ตั้งขึ้นมาจากพื้น

คำอธิบายประกอบรูปที่ ข.11

1. ป้ายและกำแพงต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงลมทั้งในกรณีที่ทิศทางลมตั้งฉากกับแผ่นป้าย ($\theta = 0°$ ในรูปที่ ข.11 ข.) และในกรณีที่ทิศทางลมทำมุมเฉียง 45° กับแผ่นป้าย ($\theta = \pm 45°$ ในรูปที่ ข.11 ค. และ ง.)

2. หน่วยแรงลมสุทธิ ซึ่งรวมหน่วยแรงลมทั้งด้านต้นลม และด้านท้ายลม สามารถคำนวณได้จาก

$$p = I_w q C_e C_g C_p \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่ ค่าประกอบ I_w, q และ C_e ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในบทที่ 2 สำหรับวิธีการอย่างง่าย

ค่าประกอบ C_g มีค่าเท่ากับ 2.35 และ

ค่าสัมประสิทธิ์ C_p จะขึ้นกับสัดส่วนรูปร่างของป้าย ทิศทางลม และตำแหน่งบนพื้นที่แผ่นป้าย ดังแสดงในรูปที่ ข.11ข. ข.11ค. และ ข.11ง. และในตารางที่ ข-1

3. ในกรณีที่ทิศทางลมตั้งฉากกับแผ่นป้าย ($\theta = 0°$) ค่าสัมประสิทธิ์ C_p มีค่าสม่ำเสมอเท่ากันทั่วทั้งพื้นที่ป้าย (รูปที่ ข.11ข) และมีค่าเท่ากับ ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ย C_{pa} ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ ข-1

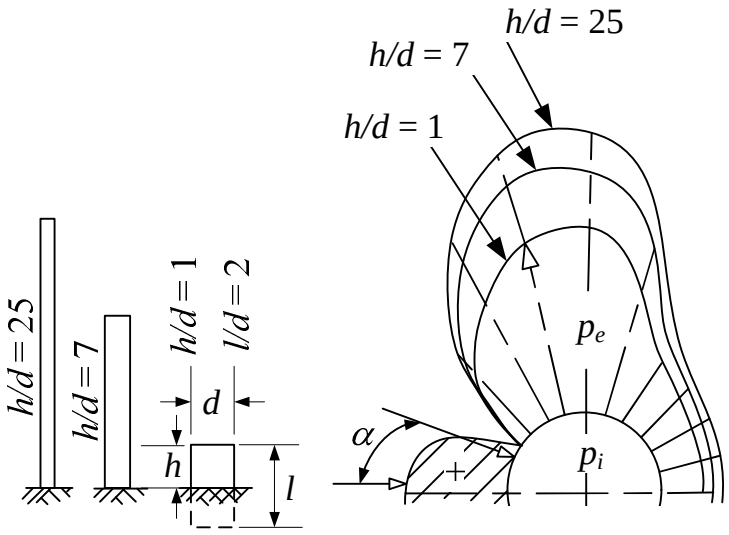
4. ในกรณีที่ทิศทางลมทำมุมเฉียง 45° กับแผ่นป้าย ($\theta = \pm 45°$) ค่าสัมประสิทธิ์ C_p มีค่าไม่สม่ำเสมอ โดยค่า C_p จะเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยถึง 90% ในบริเวณขอบที่หันเข้าหาลม และค่า C_p จะลดลงจากค่าเฉลี่ยถึง 90% ในบริเวณขอบอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ ข.11ค และ ข.11ง

5. หน่วยแรงลมสุทธิ ณ ทุกๆตำแหน่งบนแผ่นป้ายมีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นป้ายในทุกๆกรณี ($\theta = 0°$ หรือ $\theta = \pm 45°$)

6. ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ย C_{pa} ในทุกกรณี ($\theta = 0°$ หรือ $\theta = \pm 45°$) มีค่าขึ้นกับ อัตราส่วน (b/c) และ อัตราส่วน (d/h) ดังแสดงในตารางที่ ข-1

แรงลมลัพธ์ที่กระทำกับโครงสร้างหลักต้านแรงลม $F = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_f \cdot A$

โดยที่ $A = d \cdot h$



ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมลัพธ์ (C_f) สำหรับโครงสร้างที่มีค่า $d\sqrt{qC_e} > 0.167$ (ค่า q มีหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อตารางเมตร)

รูปร่างหน้าตัดและความขรุขระของพื้นผิว	อัตราส่วนความชะลูด h/d		
	25	7	1
หน้าตัดรูปวงกลม ผิวเรียบปานกลาง (เหล็ก, ไม้, คอนกรีต)	0.7	0.6	0.5
หน้าตัดรูปวงกลม ผิวขรุขระ (ขนาดของครีบ = 2%d)	0.9	0.8	0.7
หน้าตัดรูปวงกลม ผิวขรุขระมาก (ขนาดของครีบ = 8%d)	1.2	1.0	0.8
หน้าตัดรูปเหลี่ยม ผิวเรียบ หรือผิวขรุขระ	1.4	1.2	1.0

รูปที่ ข.12 โครงสร้างรูปทรงกระบอก ปล่องควัน และแทงค์น้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร (C_p) สำหรับโครงสร้างที่มีพื้นผิวเรียบปานกลาง ซึ่งมีค่า $d\sqrt{qC_e} > 0.167$ (ค่า q มีหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อตารางเมตร)

h/d	l/d	α												
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
25	50	+1.0	+0.8	+0.1	-0.9	-1.9	-2.5	-2.6	-1.9	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6
7	14	+1.0	+0.8	+0.1	-0.8	-1.7	-2.2	-2.2	-1.7	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5
1	2	+1.0	+0.8	+0.1	-0.7	-1.2	-1.6	-1.7	-1.2	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4

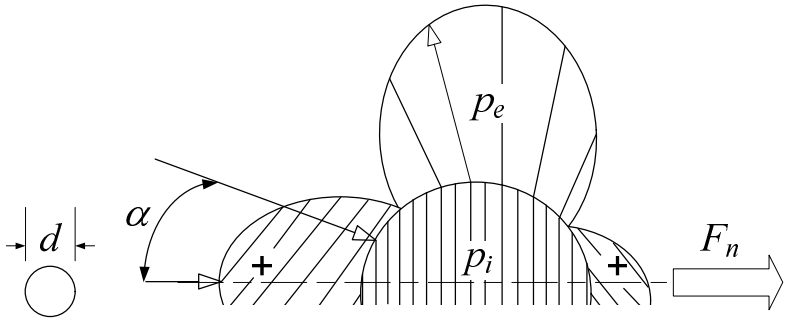
$\Delta p = p_i - p_e$ โดยที่ $p_i = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_{gi} \cdot C_{pi}$

$p_e = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_p$

โดยที่ $C_{pi} = +0.1$ สำหรับกรณีที่ปล่องควันกำลังทำงานเต็มที่

และ $C_{pi} = -0.8$ สำหรับกรณีที่ปล่องควันหยุดทำงาน

รูปที่ ข.12 โครงสร้างรูปทรงกระบอก ปล่องควัน และแทงค์น้ำ (ต่อ)



แรงลมลัพธ์ที่กระทำกับโครงสร้างหลักด้านแรงลม $F = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_f \cdot A$

โดยที่ $A = \frac{\pi d^2}{4}$

ใช้ในกรณีของโครงสร้างที่มีผิวเรียบปานกลาง และมีค่า $d\sqrt{qC_e} > 0.8$ โดยที่ค่า q มีหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมลัพธ์ (C_f) มีค่าเท่ากับ 0.2

$\Delta p = p_i - p_e$ โดยที่ p_i มีค่าเท่ากับความดันภายในของแทงค์ทรงกลม

$p_e = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_p$

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร (C_p) สำหรับโครงสร้างที่มีพื้นผิวเรียบปานกลาง ซึ่งมีค่า $d\sqrt{qC_e} > 0.8$ (ค่า q มีหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อตารางเมตร)

α =	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
C_p	+1.0	+0.9	+0.5	-0.1	-0.7	-1.1	-1.2	-1.0	-0.6	-0.2	+0.1	+0.3	+0.4

รูปที่ ข.13 โครงสร้างทรงกลม 3 มิติ

แรงลมลัพธ์ที่กระทำกับโครงสร้างหลักต้านแรงลม $F = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_f \cdot A$

โดยที่ $A = d \cdot l$

ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมลัพธ์ (C_f) สำหรับโครงสร้างที่มีค่า $l/d > 100$

ประเภทของท่อและสายส่งสัญญาณ	$d\sqrt{qC_e}$	
	< 1.67	> 1.67
สายไฟหรือสายส่งสัญญาณที่มีผิวเรียบ สายโลหะ ท่อ	1.2	0.5
สายไฟ สายส่งสัญญาณ และสายโลหะที่มีผิวเรียบปานกลาง	1.2	0.7
กลุ่มของสายเคเบิลขนาดเล็ก	1.2	0.9
กลุ่มของสายเคเบิลขนาดใหญ่	1.3	1.1

รูปที่ ข.14 ท่อ และสายส่งสัญญาณประเภทต่างๆ

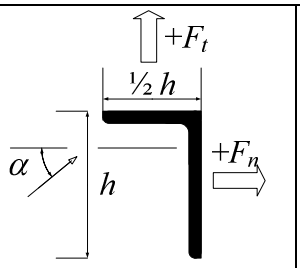
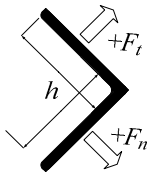
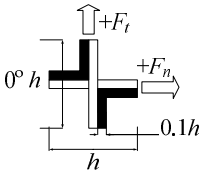
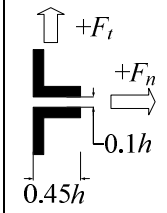
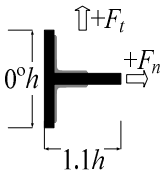
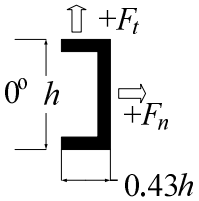
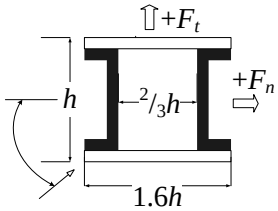
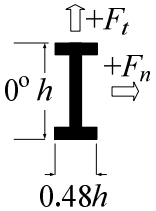
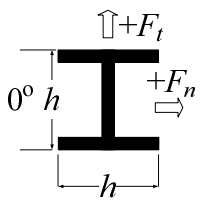
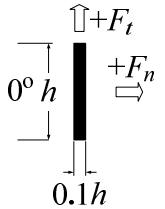
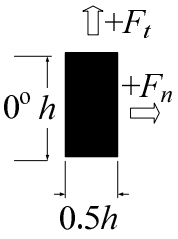
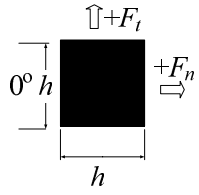
ในกรณีที่ลมพัดปะทะตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วน แรงที่ตั้งฉากกับแกน (normal force, F_n) และแรงในแนวสัมผัสกับแกนของชิ้นส่วน (tangential force, F_t) สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

แรงที่ตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วน $F_n = q \cdot C_e \cdot C_g \cdot k \cdot C_{n\infty} \cdot A$

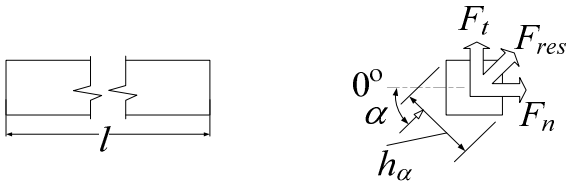
แรงในแนวสัมผัสกับแกนของชิ้นส่วน $F_t = q \cdot C_e \cdot C_g \cdot k \cdot C_{t\infty} \cdot A$

โดยที่ l คือความยาวของชิ้นส่วน และ A คือพื้นที่รับลมของชิ้นส่วน $A = h \cdot l$

ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ $C_{n\infty}$ และ $C_{t\infty}$ สำหรับชิ้นส่วนที่มีความยาวไม่จำกัด (infinite length)

												
α	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$
0°	+1.9	+0.95	+1.8	+1.8	+1.75	+0.1	+1.6	0	+2.0	0	+2.05	0
45°	+1.8	+0.8	+2.1	+1.8	+0.85	+0.85	+1.5	-0.1	+1.2	+0.9	+1.85	+0.6
90°	+2.0	+1.7	-1.9	-1.0	-0.1	+1.75	-0.95	+0.7	-1.6	+2.15	0	+0.6
135°	-1.8	-0.1	-2.0	+0.3	-0.75	+0.75	-0.5	+1.05	-1.1	+2.4	-1.6	+0.4
180°	-2.0	+0.1	-1.4	-1.4	-1.75	-0.1	-1.5	0	-1.7	± 2.1	-1.8	0
												
α	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$
0°	+1.4	0	+2.05	0	+1.6	0	+2.0	0	+2.1	0	+2.0	0
45°	+1.2	+1.6	+1.95	+0.6	+1.5	+1.5	+1.8	+0.1	+1.4	+0.7	+1.55	+1.55
90°	0	+2.2	± 0.5	+0.9	0	+1.9	0	+0.1	0	+0.75	0	+2.0

รูปที่ ข.15 ชิ้นส่วนของโครงสร้าง ทั้งหน้าตัดเดี่ยวและหน้าตัดประกอบ



ความยาวประสิทธิผล l ความสูงประสิทธิผลของชิ้นส่วน h_α

รูปแสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในการคำนวณค่าความชะลูด l / h_α

ตารางแสดงค่าประกอบลดแรง (reduction factor, *k*) สำหรับใช้กับชิ้นส่วนที่มีค่าความชะลูดต่างๆ

l / h_α	5	10	20	35	50	100	∞
k	0.60	0.65	0.75	0.85	0.90	0.95	1.0

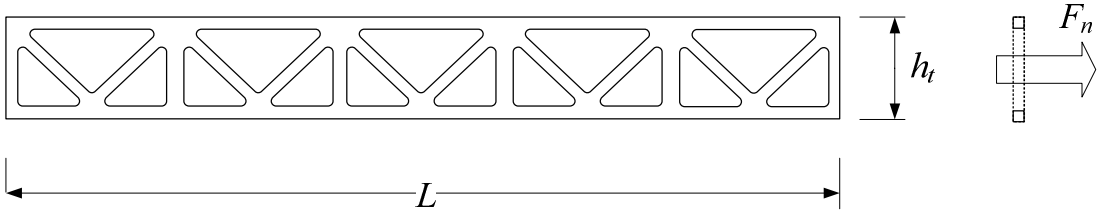
รูปที่ ข.15 ชิ้นส่วนของโครงสร้าง ทั้งหน้าตัดเดี่ยวและหน้าตัดประกอบ (ต่อ)

ในกรณีที่ลมพัดปะทะตั้งฉากกับระนาบของโครงถัก แรงลัพธ์ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบของโครงถัก (normal force, F_n) สามารถคำนวณได้จากสมการ $F_n = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot k \cdot C_{n\infty} \cdot A_s$

โดยที่ A_s คือ พื้นที่รับลมของโครงสร้างที่อยู่ในระนาบเดียวกับโครงถัก

A คือพื้นที่ของระนาบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ $A = h_t \cdot L$

A_s / A คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่รับลมทั้งหมดของโครงสร้างต่อพื้นที่ของระนาบเรียกว่า Solidity ratio (solidity ratio มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง1 ซึ่ง solidity ratio เท่ากับ 1 หมายถึงโครงถักที่มีลักษณะทึบและลมไม่สามารถลอดผ่านระนาบของโครงถักได้เลย)



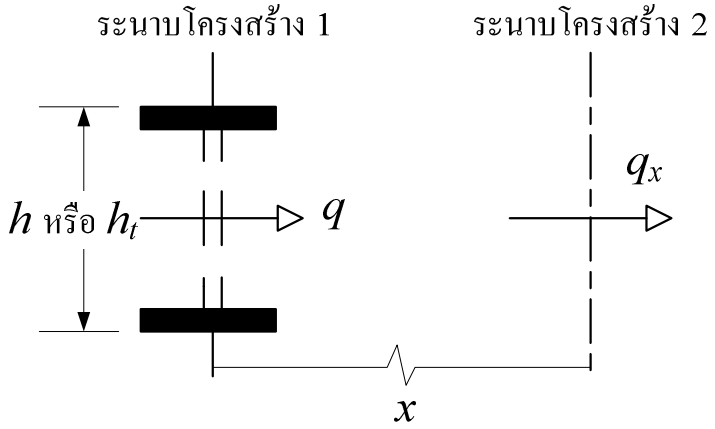
ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ $C_{n\infty}$ สำหรับโครงถักที่มีค่า $0 \le A_s / A \le 1$

A_s / A	0	0.1	0.15	0.2	0.3 ถึง 0.8	0.95	1.0
$C_{n\infty}$	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.8	2.0

ตารางแสดงค่าประกอบลดแรง (reduction factor, k) สำหรับโครงถักที่มีค่าความชะลูดต่างๆ

A_s / A L / h_t	0.25	0.5	0.9	0.95	1
5	0.96	0.91	0.87	0.77	0.6
20	0.98	0.97	0.94	0.89	0.75
50	0.99	0.98	0.97	0.95	0.9
∞	1	1	1	1	1

รูปที่ ข.16 โครงถักระนาบที่ประกอบจากชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดเป็นรูปเหลี่ยม



$$q_x = k_x \cdot q$$

ตารางแสดงค่าประกอบเนื่องจากการบดบังของลม k_x

A_s / A x / h	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
0.5	0.93	0.75	0.56	0.38	0.19	0	0	0
1	0.99	0.81	0.65	0.48	0.32	0.15	0.15	0.15
2	1.00	0.87	0.73	0.59	0.44	0.30	0.30	0.30
4	1.00	0.90	0.78	0.65	0.52	0.40	0.40	0.40
6	1.00	0.93	0.83	0.72	0.61	0.50	0.50	0.50

รูปที่ ข.17 ค่าประกอบของการบดบังของลม

แรงลัพธ์ในแนวทิศทางลมที่กระทำกับโครงสร้าง $F = \sum F_m$

โดยที่ F_m คือ แรงที่กระทำบนชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของโครงสร้าง สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$F_m = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot k \cdot C_{\infty\beta} \cdot A\cos\beta$ ในกรณีของชิ้นส่วนที่รับแรงลมโดยตรง

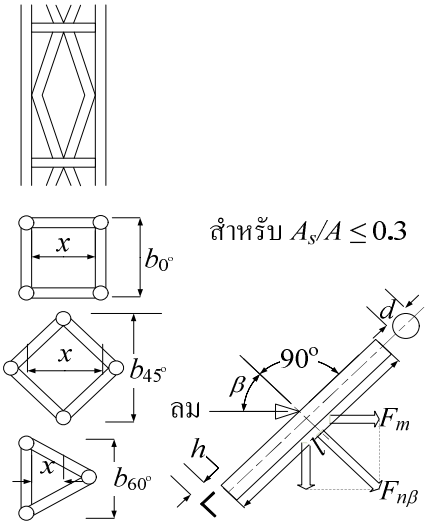
หรือ $F_m = I_w \cdot k_x q \cdot C_e \cdot C_g \cdot k \cdot C_{\infty\beta} \cdot A\cos\beta$ ในกรณีของชิ้นส่วนที่ได้รับผลกระทบจากการบดบังของลม

$A = d \cdot L$ หรือ $A = h \cdot L$ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของหน้าตัด

L = ความยาวจริงของชิ้นส่วน

β = มุมระหว่างทิศทางลมกับเส้นที่ตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วน

k_x = ค่าประกอบเนื่องจากการบดบังของลม ขึ้นอยู่กับ ค่า A_s / A และ x/b



ค่าสัมประสิทธ์ $C_{\infty\beta}$ สำหรับชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดรูปวงกลมได้แสดงไว้ในตารางด้านล่าง แต่ค่า $C_{\infty\beta}$ สำหรับชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดรูปเหลี่ยมให้คำนวณโดยใช้สมการ $C_{\infty\beta} = k_\beta \cdot C_{n\infty}$ และ $C_{\infty\beta} = k_\beta \cdot C_{t\infty}$ โดยให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ $C_{n\infty}$ และ $C_{n\infty}$ ตามที่แสดงในรูปที่ ข.15

ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ $C_{\infty\beta}$, k_β, k และ k_x

β	ชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดรูปเหลี่ยม			ชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดรูปวงกลม ผิวเรียบและผิวขรุขระ และมีค่า $d\sqrt{qC_e} < 0.167$			ชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดรูปวงกลม ผิวเรียบปานกลาง และมีค่า $d\sqrt{qC_e} < 0.167$		
	k_β	k	k_x	$C_{\infty\beta}$	k	k_x	$C_{\infty\beta}$	k	k_x
0°	1.00	ดูรูปที่ ข.15	ดูรูปที่ ข.17	1.20	ดูรูปที่ ข.15	ดูรูปที่ ข.17	0.60	0.9 สำหรับ $l/d = 25$	0.95
15°	0.98			1.16			0.58		
30°	0.93			1.04			0.53		
45°	0.88			0.85			0.42		
60°	0.80			0.60			0.28		

รูปที่ ข.18 โครงถัก 3 มิติ

ภาคผนวก ค
แรงลมออกแบบสำหรับอาคารเตี้ย

ค.1 แรงลมออกแบบสำหรับโครงสร้างหลักของอาคารเตี้ย

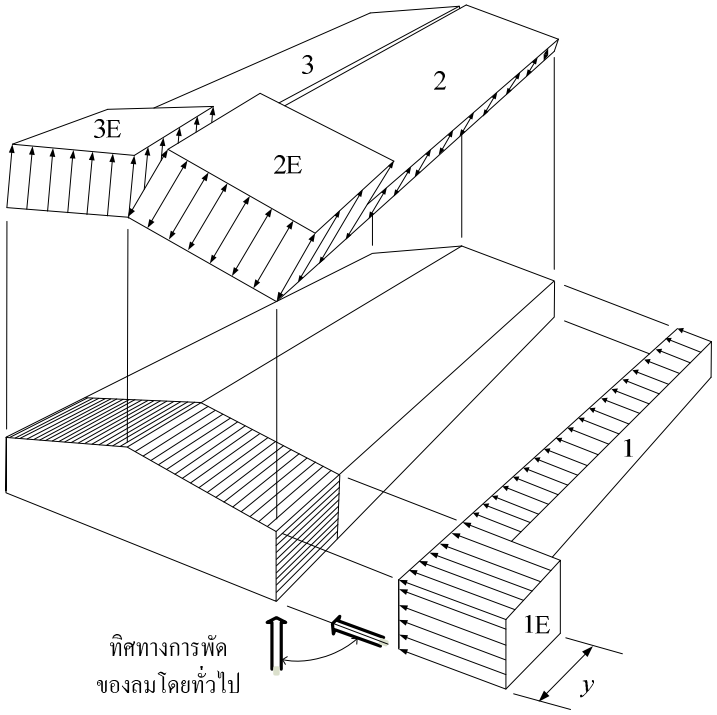
คำอธิบายประกอบการใช้ตารางที่ ค-1 ถึง ตารางที่ ค-4

1. ค่าหน่วยแรงลมที่แสดงในตารางที่ ค-1 ถึงตารางที่ ค-3 เป็นค่าหน่วยแรงลมลัพธ์ที่กระทบกับพื้นผิวของผนังและหลังคาของอาคาร สำหรับใช้ออกแบบโครงสร้างหลักของอาคารเตี้ยที่มีความลาดชันของหลังคาค่าต่างๆ โดยได้คำนึงถึงผลของความดันลมภายนอกอาคารและความดันลมภายในอาคารแล้ว
2. ค่าหน่วยแรงลมลัพธ์ที่แสดงในตารางที่ ค-1 ถึงตารางที่ ค-3 เป็นหน่วยแรงลมที่กระทำกับพื้นผิวที่อยู่ในโซนต่างๆ ของอาคาร ตามที่กำหนดในรูปที่ ค.1 ข.1 และคำอธิบายประกอบรูป ข.1
3. ความแตกต่างของค่าหน่วยแรงลมที่แสดงในตารางที่ ค-1 ถึงตารางที่ ค-3 เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าหน่วยแรงลมภายในอาคาร ซึ่งสามารถพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมได้ดังนี้
   - ตารางที่ ค-1 ใช้สำหรับอาคารที่มีลักษณะของช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดของกรณีที่ 1 ($C_{pi} = -0.15$ ถึง 0.0 และ $C_{gi} = 2$)
   - ตารางที่ ค-2 ใช้สำหรับอาคารที่มีลักษณะของช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดของกรณีที่ 2 ($C_{pi} = -0.45$ ถึง 0.3 และ $C_{gi} = 2$)
   - ตารางที่ ค-3ก และ ค-3ข ใช้สำหรับอาคารที่มีลักษณะของช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดของกรณีที่ 3 ($C_{pi} = -0.7$ ถึง 0.7 และ $C_{gi} = 2$)
4. การออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม หน่วยแรงลมภายในสำหรับแรงในแนวราบจะมีการหักล้างกัน เนื่องจากหน่วยแรงลมภายในอาคารด้านต้นลมและท้ายลมมีค่าเท่ากัน แต่ทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นตารางในภาคผนวก ค ได้รวมแรงด้านต้นลมและท้ายลมมากระทำที่ผนังด้านต้นลม อย่างไรก็ตาม หน่วยแรงลมภายในมีผลสำหรับการออกแบบโครงสร้างหลังคา ตารางในภาคผนวก ค-1 และ ค-2 ใช้หน่วยแรงลมภายในเป็นบวกเป็นตัวควบคุม สำหรับหลังคาที่มีความชันน้อยกว่า 25 องศา แต่สำหรับหลังคาที่มีความชันมากกว่า 25 องศา ต้องตรวจสอบทั้งหน่วยแรงลมภายในเป็นลบ (หน่วยแรงลมที่กระทำในแบบที่ 1) และหน่วยแรงลมภายในเป็นบวก (หน่วยแรงลมที่กระทำในแบบที่ 2) เนื่องจากหน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำที่หลังคาด้านต้นลมและท้ายลม มีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับ ส่วนช่องเปิดในกรณีที่ 3 หน่วยแรงลมภายในมีค่ามาก ดังนั้น ตารางที่ ค-3ก เป็นผลมาจากการคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายในอาคารที่เป็นค่าลบ ส่วนตารางที่ ค-3ข เป็นผลมาจากการคำนวณ

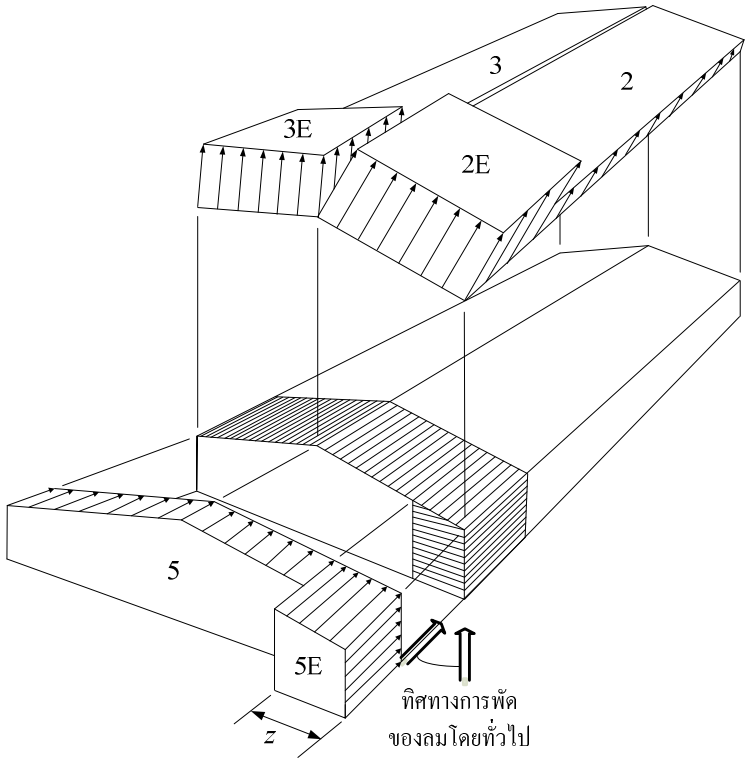
โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายในอาคารที่เป็นค่าบวก ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าหน่วยแรงลมที่แสดงในตารางที่ ค-3ก และ ตารางที่ ค-3ข รวมเป็น 4 แบบ ในขั้นตอนของการวิเคราะห์โครงสร้าง

5. ต้องใช้ค่าหน่วยแรงลมที่กระทำในทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา และทิศทางลมขนานกับสันหลังคา เพื่อให้ครอบคลุมผลกระทบที่เกิดจากทิศทางการปะทะของลม ในตารางที่ ค-1 และ ค-2 แรงแบบที่ 1 และ 2 เป็นแบบหน่วยแรงลมที่กระทำในทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา ส่วนแรงแบบที่ 3 เป็นแบบหน่วยแรงลมที่กระทำขนานกับสันหลังคา ในตารางที่ ค-3ก แรงแบบที่ 1 และ 3 เป็นแบบหน่วยแรงลมที่กระทำในทิศทางลมขนานกับสันหลังคา ส่วนแรงแบบที่ 2 และ 4 เป็นแบบหน่วยแรงลมที่กระทำในทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา

6. ค่าหน่วยแรงลมลัพธ์ที่แสดงในตารางที่ ค-1 ถึงตารางที่ ค-3 ใช้สำหรับอาคารที่มีความสูง 10 เมตร ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A (เปิดโล่ง) และมีค่า $I_w = 1$ สำหรับอาคารที่มีความสูงเป็นค่าอื่นหรือตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ B (ชานเมือง) ให้นำค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงในตารางที่ ค-4 มาคูณเพื่อปรับค่าหน่วยแรงลมให้สอดคล้องกับลักษณะของอาคารนั้นๆ



ก. ทิศทางการพัดของลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวตั้งฉากกับสันหลังคา



ข. ทิศทางการพัดของลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวขนานกับสันหลังคา

รูปที่ ค.1 แรงลมสถิตเทียบเท่า สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักของอาคารเตี้ย สำหรับประกอบการใช้ตารางที่ ค-1 ถึง ค-3 (ความกว้าง y และ z ดูจากรูปที่ ข.1)

ตารางที่ ค-1 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบโครงสร้างหลัก สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A มีความสูง (h) เท่ากับ 10 เมตร และมีช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ของหน่วยแรงลมภายในอาคาร

(หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร)

ความเร็วลมอ้างอิง (เมตร/วินาที)	ความชันหลังคา (องศา)	Load case	หน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในแต่ละโซน							
			บริเวณกลางผนังและหลังคา				บริเวณขอบผนังและหลังคา			
			1*	2	3	5**	1E*	2E	3E	5E**
25.0	0 ถึง 5	1	507.8	-507.8	-273.4	-	761.7	-781.3	-390.6	-
	10		572.9	-507.8	-299.5	-	859.4	-781.3	-429.7	-
	15		638.0	-507.8	-325.5	-	957.0	-781.3	-468.8	-
	20		703.1	-507.8	-351.6	-	1054.7	-781.3	-507.8	-
	25		693.4	-175.8	-332.0	-	957.0	-175.8	-332.0	-
	30 ถึง 45	1	683.6	273.4	-195.3	-	859.4	312.5	-273.4	-
		2	683.6	156.3	-312.5	-	859.4	195.3	-390.6	-
	90	1	683.6	527.3	-156.3	-	859.4	625.0	-234.4	-
		2	683.6	410.2	-273.4	-	859.4	507.8	-351.6	-
	ความชันทุกค่า	3	-	-507.8	-273.4	507.8	-	-781.3	-390.6	761.7
27.0	0 ถึง 5	1	592.3	-592.3	-318.9	-	888.5	-911.3	-455.6	-
	10		668.3	-592.3	-349.3	-	1002.4	-911.3	-501.2	-
	15		744.2	-592.3	-379.7	-	1116.3	-911.3	-546.8	-
	20		820.1	-592.3	-410.1	-	1230.2	-911.3	-592.3	-
	25		808.7	-205.0	-387.3	-	1116.3	-341.7	-524.0	-
	30 ถึง 45	1	797.3	318.9	-227.8	-	1002.4	364.5	-318.9	-
		2	797.3	182.3	-364.5	-	1002.4	227.8	-455.6	-
	90	1	797.3	615.1	-182.3	-	1002.4	729.0	-273.4	-
		2	797.3	478.4	-318.9	-	1002.4	592.3	-410.1	-
	ความชันทุกค่า	3	-	-592.3	-318.9	592.3	0.0	-911.3	-455.6	888.5
29.0	0 ถึง 5	1	683.3	-683.3	-367.9	-	1025.0	-1051.3	-525.6	-
	10		770.9	-683.3	-403.0	-	1156.4	-1051.3	-578.2	-
	15		858.5	-683.3	-438.0	-	1287.8	-1051.3	-630.8	-
	20		946.1	-683.3	-473.1	-	1419.2	-1051.3	-683.3	-
	25		933.0	-236.5	-446.8	-	1287.8	-394.2	-604.5	-
	30 ถึง 45	1	919.8	367.9	-262.8	-	1156.4	420.5	-367.9	-
		2	919.8	210.3	-420.5	-	1156.4	262.8	-525.6	-
	90	1	919.8	709.6	-210.3	-	1156.4	841.0	-315.4	-
		2	919.8	551.9	-367.9	-	1156.4	683.3	-473.1	-
	ความชันทุกค่า	3	0.0	-683.3	-367.9	683.3	-	-1051.3	-525.6	1025.0
30.0	0 ถึง 5	1	731.3	-731.3	-393.8	-	1096.9	-1125.0	-562.5	-
	10		825.0	-731.3	-431.3	-	1237.5	-1125.0	-618.8	-
	15		918.8	-731.3	-468.8	-	1378.1	-1125.0	-675.0	-
	20		1012.5	-731.3	-506.3	-	1518.8	-1125.0	-731.3	-
	25		998.4	-253.1	-478.1	-	1378.1	-421.9	-646.9	-
	30 ถึง 45	1	984.4	393.8	-281.3	-	1237.5	450.0	-393.8	-
		2	984.4	225.0	-450.0	-	1237.5	281.3	-562.5	-
	90	1	984.4	759.4	-225.0	-	1237.5	900.0	-337.5	-
		2	984.4	590.6	-393.8	-	1237.5	731.3	-506.3	-
	ความชันทุกค่า	3	0.0	-731.3	-393.8	731.3	-	-1125.0	-562.5	1096.9

* เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 1 และ 4 (หรือพื้นผิว 1E และ 4E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

** เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 5 และ 6 (หรือพื้นผิว 5E และ 6E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

(หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร)

ความเร็วลมอ้างอิง (เมตร/วินาที)	ความชันหลังคา (องศา)	Load case	หน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในแต่ละโซน							
			บริเวณกลางผนังและหลังคา				บริเวณขอบผนังและหลังคา			
			1*	2	3	5**	1E*	2E	3E	5E**
25.0	0 ถึง 5	1	51.8	-51.8	-27.9	-	77.7	-79.7	-39.8	-
	10	1	58.4	-51.8	-30.5	-	87.6	-79.7	-43.8	-
	15	1	65.1	-51.8	-33.2	-	97.6	-79.7	-47.8	-
	20	1	71.7	-51.8	-35.8	-	107.5	-79.7	-51.8	-
	25	1	70.7	-17.9	-33.9	-	97.6	-17.9	-33.9	-
	30 ถึง 45	1	69.7	27.9	-19.9	-	87.6	31.9	-27.9	-
		2	69.7	15.9	-31.9	-	87.6	19.9	-39.8	-
	90	1	69.7	53.8	-15.9	-	87.6	63.7	-23.9	-
		2	69.7	41.8	-27.9	-	87.6	51.8	-35.8	-
	ความชันทุกค่า	3	-	-51.8	-27.9	51.8	-	-79.7	-39.8	77.7
27.0	0 ถึง 5	1	60.4	-60.4	-32.5	-	90.6	-92.9	-46.5	-
	10	1	68.1	-60.4	-35.6	-	102.2	-92.9	-51.1	-
	15	1	75.9	-60.4	-38.7	-	113.8	-92.9	-55.8	-
	20	1	83.6	-60.4	-41.8	-	125.4	-92.9	-60.4	-
	25	1	82.5	-20.9	-39.5	-	113.8	-34.8	-53.4	-
	30 ถึง 45	1	81.3	32.5	-23.2	-	102.2	37.2	-32.5	-
		2	81.3	18.6	-37.2	-	102.2	23.2	-46.5	-
	90	1	81.3	62.7	-18.6	-	102.2	74.3	-27.9	-
		2	81.3	48.8	-32.5	-	102.2	60.4	-41.8	-
	ความชันทุกค่า	3	-	-60.4	-32.5	60.4	0.0	-92.9	-46.5	90.6
29.0	0 ถึง 5	1	69.7	-69.7	-37.5	-	104.5	-107.2	-53.6	-
	10	1	78.6	-69.7	-41.1	-	117.9	-107.2	-59.0	-
	15	1	87.5	-69.7	-44.7	-	131.3	-107.2	-64.3	-
	20	1	96.5	-69.7	-48.2	-	144.7	-107.2	-69.7	-
	25	1	95.1	-24.1	-45.6	-	131.3	-40.2	-61.6	-
	30 ถึง 45	1	93.8	37.5	-26.8	-	117.9	42.9	-37.5	-
		2	93.8	21.4	-42.9	-	117.9	26.8	-53.6	-
	90	1	93.8	72.4	-21.4	-	117.9	85.8	-32.2	-
		2	93.8	56.3	-37.5	-	117.9	69.7	-48.2	-
	ความชันทุกค่า	3	0.0	-69.7	-37.5	69.7	-	-107.2	-53.6	104.5
30.0	0 ถึง 5	1	74.6	-74.6	-40.2	-	111.9	-114.7	-57.4	-
	10	1	84.1	-74.6	-44.0	-	126.2	-114.7	-63.1	-
	15	1	93.7	-74.6	-47.8	-	140.5	-114.7	-68.8	-
	20	1	103.2	-74.6	-51.6	-	154.9	-114.7	-74.6	-
	25	1	101.8	-25.8	-48.8	-	140.5	-43.0	-66.0	-
	30 ถึง 45	1	100.4	40.2	-28.7	-	126.2	45.9	-40.2	-
		2	100.4	22.9	-45.9	-	126.2	28.7	-57.4	-
	90	1	100.4	77.4	-22.9	-	126.2	91.8	-34.4	-
		2	100.4	60.2	-40.2	-	126.2	74.6	-51.6	-
	ความชันทุกค่า	3	0.0	-74.6	-40.2	74.6	-	-114.7	-57.4	111.9

* เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 1 และ 4 (หรือพื้นผิว 1E และ 4E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

** เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 5 และ 6 (หรือพื้นผิว 5E และ 6E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

ตารางที่ ค-2 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบโครงสร้างหลัก สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A มีความสูง (h) เท่ากับ 10 เมตร และมีช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดในกรณีที่ 2 ของหน่วยแรงลมภายในอาคาร

(หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร)

ความเร็วลมอ้างอิง (เมตร/วินาที)	ความชันหลังคา (องศา)	Load case	หน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในแต่ละโซน							
			บริเวณกลางผนังและหลังคา				บริเวณขอบผนังและหลังคา			
			1*	2	3	5**	1E*	2E	3E	5E**
25.0	0 ถึง 5	1	507.8	-742.2	-507.8	-	761.7	-1015.6	-625.0	-
	10		572.9	-742.2	-533.9	-	859.4	-1015.6	-664.1	-
	15		638.0	-742.2	-559.9	-	957.0	-1015.6	-703.1	-
	20		703.1	-742.2	-585.9	-	1054.7	-1015.6	-742.2	-
	25		693.4	-410.2	-566.4	-	957.0	58.6	-97.7	-
	30 ถึง 45	1	683.6	507.8	39.1	-	859.4	546.9	-39.1	-
		2	683.6	-78.1	-546.9	-	859.4	-39.1	-625.0	-
	90	1	683.6	761.7	78.1	-	859.4	859.4	0.0	-
		2	683.6	175.8	-507.8	-	859.4	273.4	-585.9	-
	ความชันทุกค่า	3	-	-742.2	-507.8	507.8	-	-1015.6	-625.0	761.7
27.0	0 ถึง 5	1	592.3	-865.7	-592.3	-	888.5	-1184.6	-729.0	-
	10		668.3	-865.7	-622.7	-	1002.4	-1184.6	-774.6	-
	15		744.2	-865.7	-653.1	-	1116.3	-1184.6	-820.1	-
	20		820.1	-865.7	-683.4	-	1230.2	-1184.6	-865.7	-
	25		808.7	-478.4	-660.7	-	1116.3	-615.1	-797.3	-
	30 ถึง 45	1	797.3	592.3	45.6	-	1002.4	637.9	-45.6	-
		2	797.3	-91.1	-637.9	-	1002.4	-45.6	-729.0	-
	90	1	797.3	888.5	91.1	-	1002.4	1002.4	0.0	-
		2	797.3	205.0	-592.3	-	1002.4	318.9	-683.4	-
	ความชันทุกค่า	3	-	-865.7	-592.3	592.3	0.0	-1184.6	-729.0	888.5
29.0	0 ถึง 5	1	683.3	-998.7	-683.3	-	1025.0	-1366.6	-841.0	-
	10		770.9	-998.7	-718.4	-	1156.4	-1366.6	-893.6	-
	15		858.5	-998.7	-753.4	-	1287.8	-1366.6	-946.1	-
	20		946.1	-998.7	-788.4	-	1419.2	-1366.6	-998.7	-
	25		933.0	-551.9	-762.2	-	1287.8	-709.6	-919.8	-
	30 ถึง 45	1	919.8	683.3	52.6	-	1156.4	735.9	-52.6	-
		2	919.8	-105.1	-735.9	-	1156.4	-52.6	-841.0	-
	90	1	919.8	1025.0	105.1	-	1156.4	1156.4	0.0	-
		2	919.8	236.5	-683.3	-	1156.4	367.9	-788.4	-
	ความชันทุกค่า	3	0.0	-998.7	-683.3	683.3	-	-1366.6	-841.0	1025.0
30.0	0 ถึง 5	1	731.3	-1068.8	-731.3	-	1096.9	-1462.5	-900.0	-
	10		825.0	-1068.8	-768.8	-	1237.5	-1462.5	-956.3	-
	15		918.8	-1068.8	-806.3	-	1378.1	-1462.5	-1012.5	-
	20		1012.5	-1068.8	-843.8	-	1518.8	-1462.5	-1068.8	-
	25		998.4	-590.6	-815.6	-	1378.1	-759.4	-984.4	-
	30 ถึง 45	1	984.4	731.3	56.3	-	1237.5	787.5	-56.3	-
		2	984.4	-112.5	-787.5	-	1237.5	-56.3	-900.0	-
	90	1	984.4	1096.9	112.5	-	1237.5	1237.5	0.0	-
		2	984.4	253.1	-731.3	-	1237.5	393.8	-843.8	-
	ความชันทุกค่า	3	0.0	-1068.8	-731.3	731.3	-	-1462.5	-900.0	1096.9

* เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 1 และ 4 (หรือพื้นผิว 1E และ 4E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

** เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 5 และ 6 (หรือพื้นผิว 5E และ 6E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

(หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร)

ความเร็วลมอ้างอิง (เมตร/วินาที)	ความชันหลังคา (องศา)	Load case	หน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในแต่ละโซน							
			บริเวณกลางผนังและหลังคา				บริเวณขอบผนังและหลังคา			
			1*	2	3	5**	1E*	2E	3E	5E**
25.0	0 ถึง 5	1	51.8	-75.7	-51.8	-	77.7	-103.6	-63.7	-
	10		58.4	-75.7	-54.4	-	87.6	-103.6	-67.7	-
	15		65.1	-75.7	-57.1	-	97.6	-103.6	-71.7	-
	20		71.7	-75.7	-59.7	-	107.5	-103.6	-75.7	-
	25		70.7	-41.8	-57.8	-	97.6	6.0	-10.0	-
	30 ถึง 45	1	69.7	51.8	4.0	-	87.6	55.8	-4.0	-
		2	69.7	-8.0	-55.8	-	87.6	-4.0	-63.7	-
	90	1	69.7	77.7	8.0	-	87.6	87.6	0.0	-
		2	69.7	17.9	-51.8	-	87.6	27.9	-59.7	-
	ความชันทุกค่า	3	-	-75.7	-51.8	51.8	-	-103.6	-63.7	77.7
27.0	0 ถึง 5	1	60.4	-88.3	-60.4	-	90.6	-120.8	-74.3	-
	10		68.1	-88.3	-63.5	-	102.2	-120.8	-79.0	-
	15		75.9	-88.3	-66.6	-	113.8	-120.8	-83.6	-
	20		83.6	-88.3	-69.7	-	125.4	-120.8	-88.3	-
	25		82.5	-48.8	-67.4	-	113.8	-62.7	-81.3	-
	30 ถึง 45	1	81.3	60.4	4.6	-	102.2	65.0	-4.6	-
		2	81.3	-9.3	-65.0	-	102.2	-4.6	-74.3	-
	90	1	81.3	90.6	9.3	-	102.2	102.2	0.0	-
		2	81.3	20.9	-60.4	-	102.2	32.5	-69.7	-
	ความชันทุกค่า	3	-	-88.3	-60.4	60.4	0.0	-120.8	-74.3	90.6
29.0	0 ถึง 5	1	69.7	-101.8	-69.7	-	104.5	-139.4	-85.8	-
	10		78.6	-101.8	-73.3	-	117.9	-139.4	-91.1	-
	15		87.5	-101.8	-76.8	-	131.3	-139.4	-96.5	-
	20		96.5	-101.8	-80.4	-	144.7	-139.4	-101.8	-
	25		95.1	-56.3	-77.7	-	131.3	-72.4	-93.8	-
	30 ถึง 45	1	93.8	69.7	5.4	-	117.9	75.0	-5.4	-
		2	93.8	-10.7	-75.0	-	117.9	-5.4	-85.8	-
	90	1	93.8	104.5	10.7	-	117.9	117.9	0.0	-
		2	93.8	24.1	-69.7	-	117.9	37.5	-80.4	-
	ความชันทุกค่า	3	0.0	-101.8	-69.7	69.7	-	-139.4	-85.8	104.5
30.0	0 ถึง 5	1	74.6	-109.0	-74.6	-	111.9	-149.1	-91.8	-
	10		84.1	-109.0	-78.4	-	126.2	-149.1	-97.5	-
	15		93.7	-109.0	-82.2	-	140.5	-149.1	-103.2	-
	20		103.2	-109.0	-86.0	-	154.9	-149.1	-109.0	-
	25		101.8	-60.2	-83.2	-	140.5	-77.4	-100.4	-
	30 ถึง 45	1	100.4	74.6	5.7	-	126.2	80.3	-5.7	-
		2	100.4	-11.5	-80.3	-	126.2	-5.7	-91.8	-
	90	1	100.4	111.9	11.5	-	126.2	126.2	0.0	-
		2	100.4	25.8	-74.6	-	126.2	40.2	-86.0	-
	ความชันทุกค่า	3	0.0	-109.0	-74.6	74.6	-	-149.1	-91.8	111.9

* เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 1 และ 4 (หรือพื้นผิว 1E และ 4E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

** เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 5 และ 6 (หรือพื้นผิว 5E และ 6E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

ตารางที่ ค-3ก ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบโครงสร้างหลัก สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A มีความสูง (h) เท่ากับ 10 เมตร และมีช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดในกรณีที่ 3 ของหน่วยแรงลมภายในอาคาร – กรณีแรงลมภายในเป็นค่าลบ

(หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร)

ความเร็วลมอ้างอิง (เมตร/วินาที)	ความชันหลังคา (องศา)	Load case	หน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในแต่ละโซน (กรณีที่แรงลมภายในเป็นค่าลบ)							
			บริเวณกลางผนังและหลังคา				บริเวณขอบผนังและหลังคา			
			1*	2	3	5**	1E*	2E	3E	5E**
25.0	0 ถึง 5	1	507.8	39.1	273.4	-	761.7	-234.4	156.3	-
	10		572.9	39.1	247.4	-	859.4	-234.4	117.2	-
	15		638.0	39.1	221.4	-	957.0	-234.4	78.1	-
	20		703.1	39.1	195.3	-	1054.7	-234.4	39.1	-
	25		693.4	371.1	214.8	-	957.0	253.9	97.7	-
	30 ถึง 45		683.6	703.1	234.4	-	859.4	742.2	156.3	-
	90		683.6	957.0	273.4	-	859.4	1054.7	195.3	-
	ความชันทุกค่า	2	-	39.1	273.4	507.8	-	-234.4	156.3	761.7
27.0	0 ถึง 5	1	592.3	45.6	318.9	-	888.5	-273.4	182.3	-
	10		668.3	45.6	288.6	-	1002.4	-273.4	136.7	-
	15		744.2	45.6	258.2	-	1116.3	-273.4	91.1	-
	20		820.1	45.6	227.8	-	1230.2	-273.4	45.6	-
	25		808.7	432.8	250.6	-	1116.3	296.2	113.9	-
	30 ถึง 45		797.3	820.1	273.4	-	1002.4	865.7	182.3	-
	90		797.3	1116.3	318.9	-	1002.4	1230.2	227.8	-
	ความชันทุกค่า	2	-	45.6	318.9	592.3	0.0	-273.4	182.3	888.5
29.0	0 ถึง 5	1	683.3	52.6	367.9	-	1025.0	-315.4	210.3	-
	10		770.9	52.6	332.9	-	1156.4	-315.4	157.7	-
	15		858.5	52.6	297.9	-	1287.8	-315.4	105.1	-
	20		946.1	52.6	262.8	-	1419.2	-315.4	52.6	-
	25		933.0	499.3	289.1	-	1287.8	341.7	131.4	-
	30 ถึง 45		919.8	946.1	315.4	-	1156.4	998.7	210.3	-
	90		919.8	1287.8	367.9	-	1156.4	1419.2	262.8	-
	ความชันทุกค่า	2	-	52.6	367.9	683.3	-	-315.4	210.3	1025.0
30.0	0 ถึง 5	1	731.3	56.2	393.8	-	1096.9	-337.5	225.0	-
	10		825.0	56.2	356.3	-	1237.5	-337.5	168.8	-
	15		918.8	56.2	318.8	-	1378.1	-337.5	112.5	-
	20		1012.5	56.2	281.3	-	1518.8	-337.5	56.2	-
	25		998.4	534.4	309.4	-	1378.1	365.6	140.6	-
	30 ถึง 45		984.4	1012.5	337.5	-	1237.5	1068.8	225.0	-
	90		984.4	1378.1	393.8	-	1237.5	1518.8	281.3	-
	ความชันทุกค่า	2	-	56.2	393.8	731.3	-	-337.5	225.0	1096.9

* เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 1 และ 4 (หรือพื้นผิว 1E และ 4E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

** เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 5 และ 6 (หรือพื้นผิว 5E และ 6E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

ตารางที่ ค-3ก (ต่อ)

(หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร)

ความเร็วลมอ้างอิง (เมตร/วินาที)	ความชันหลังคา (องศา)	Load case	หน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในแต่ละโซน (กรณีที่แรงลมภายในเป็นค่าลบ)							
			บริเวณกลางผนังและหลังคา				บริเวณขอบผนังและหลังคา			
			1*	2	3	5**	1E*	2E	3E	5E**
25.0	0 ถึง 5	1	51.8	4.0	27.9	-	77.7	-23.9	15.9	-
	10		58.4	4.0	25.2	-	87.6	-23.9	11.9	-
	15		65.1	4.0	22.6	-	97.6	-23.9	8.0	-
	20		71.7	4.0	19.9	-	107.5	-23.9	4.0	-
	25		70.7	37.8	21.9	-	97.6	25.9	10.0	-
	30 ถึง 45		69.7	71.7	23.9	-	87.6	75.7	15.9	-
	90		69.7	97.6	27.9	-	87.6	107.5	19.9	-
	ความชันทุกค่า	2	-	4.0	27.9	51.8	-	-23.9	15.9	77.7
27.0	0 to 5	1	60.4	4.6	32.5	-	90.6	-27.9	18.6	-
	10		68.1	4.6	29.4	-	102.2	-27.9	13.9	-
	15		75.9	4.6	26.3	-	113.8	-27.9	9.3	-
	20		83.6	4.6	23.2	-	125.4	-27.9	4.6	-
	25		82.5	44.1	25.6	-	113.8	30.2	11.6	-
	30 ถึง 45		81.3	83.6	27.9	-	102.2	88.3	18.6	-
	90		81.3	113.8	32.5	-	102.2	125.4	23.2	-
	ความชันทุกค่า	2	-	4.6	32.5	60.4	0.0	-27.9	18.6	90.6
29.0	0 to 5	1	69.7	5.4	37.5	-	104.5	-32.2	21.4	-
	10		78.6	5.4	33.9	-	117.9	-32.2	16.1	-
	15		87.5	5.4	30.4	-	131.3	-32.2	10.7	-
	20		96.5	5.4	26.8	-	144.7	-32.2	5.4	-
	25		95.1	50.9	29.5	-	131.3	34.8	13.4	-
	30 ถึง 45		93.8	96.5	32.2	-	117.9	101.8	21.4	-
	90		93.8	131.3	37.5	-	117.9	144.7	26.8	-
	ความชันทุกค่า	2	-	5.4	37.5	69.7	-	-32.2	21.4	104.5
30.0	0 to 5	1	74.6	5.7	40.2	-	111.9	-34.4	22.9	-
	10		84.1	5.7	36.3	-	126.2	-34.4	17.2	-
	15		93.7	5.7	32.5	-	140.5	-34.4	11.5	-
	20		103.2	5.7	28.7	-	154.9	-34.4	5.7	-
	25		101.8	54.5	31.5	-	140.5	37.3	14.3	-
	30 ถึง 45		100.4	103.2	34.4	-	126.2	109.0	22.9	-
	90		100.4	140.5	40.2	-	126.2	154.9	28.7	-
	ความชันทุกค่า	2	-	5.7	40.2	74.6	-	-34.4	22.9	111.9

* เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 1 และ 4 (หรือพื้นผิว 1E และ 4E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

** เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 5 และ 6 (หรือพื้นผิว 5E และ 6E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

ตารางที่ ค-3ข ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบโครงสร้างหลัก สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A มีความสูง (h) เท่ากับ 10 เมตร และมีช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดในกรณีที่ 3 ของหน่วยแรงลมภายในอาคาร – กรณีแรงลมภายในเป็นค่าบวก

(หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร)

ความเร็วลมอ้างอิง (เมตร/วินาที)	ความชันหลังคา (องศา)	Load case	หน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในแต่ละโซน (กรณีที่แรงลมภายในเป็นค่าบวก)							
			บริเวณกลางผนังและหลังคา				บริเวณขอบผนังและหลังคา			
			1*	2	3	5**	1E*	2E	3E	5E**
25.0	0 ถึง 5	3	507.8	-1054.7	-820.3	-	761.7	-1328.1	-937.5	-
	10		572.9	-1054.7	-846.4	-	859.4	-1328.1	-976.6	-
	15		638.0	-1054.7	-872.4	-	957.0	-1328.1	-1015.6	-
	20		703.1	-1054.7	-898.4	-	1054.7	-1328.1	-1054.7	-
	25		693.4	-722.7	-878.9	-	957.0	-839.8	-996.1	-
	30 ถึง 45		683.6	-390.6	-859.4	-	859.4	-351.6	-937.5	-
	90		683.6	-136.7	-820.3	-	859.4	-39.1	-898.4	-
	ความชันทุกค่า	4	-	-1054.7	-820.3	507.8	-	-1328.1	-937.5	761.7
27.0	0 to 5	3	592.3	-1230.2	-956.8	-	888.5	-1549.1	-1093.5	-
	10		668.3	-1230.2	-987.2	-	1002.4	-1549.1	-1139.1	-
	15		744.2	-1230.2	-1017.6	-	1116.3	-1549.1	-1184.6	-
	20		820.1	-1230.2	-1047.9	-	1230.2	-1549.1	-1230.2	-
	25		808.7	-842.9	-1025.2	-	1116.3	-979.6	-1161.8	-
	30 ถึง 45		797.3	-455.6	-1002.4	-	1002.4	-410.1	-1093.5	-
	90		797.3	-159.5	-956.8	-	1002.4	-45.6	-1047.9	-
	ความชันทุกค่า	4	-	-1230.2	-956.8	592.3	0.0	-1549.1	-1093.5	888.5
29.0	0 to 5	3	683.3	-1419.2	-1103.8	-	1025.0	-1787.1	-1261.5	-
	10		770.9	-1419.2	-1138.9	-	1156.4	-1787.1	-1314.1	-
	15		858.5	-1419.2	-1173.9	-	1287.8	-1787.1	-1366.6	-
	20		946.1	-1419.2	-1208.9	-	1419.2	-1787.1	-1419.2	-
	25		933.0	-972.4	-1182.7	-	1287.8	-1130.1	-1340.3	-
	30 ถึง 45		919.8	-525.6	-1156.4	-	1156.4	-473.1	-1261.5	-
	90		919.8	-184.0	-1103.8	-	1156.4	-52.6	-1208.9	-
	ความชันทุกค่า	4	-	-1419.2	-1103.8	683.3	-	-1787.1	-1261.5	1025.0
30.0	0 to 5	3	731.3	-1518.8	-1181.3	-	1096.9	-1912.5	-1350.0	-
	10		825.0	-1518.8	-1218.8	-	1237.5	-1912.5	-1406.3	-
	15		918.8	-1518.8	-1256.3	-	1378.1	-1912.5	-1462.5	-
	20		1012.5	-1518.8	-1293.8	-	1518.8	-1912.5	-1518.8	-
	25		998.4	-1040.6	-1265.6	-	1378.1	-1209.4	-1434.4	-
	30 ถึง 45		984.4	-562.5	-1237.5	-	1237.5	-506.3	-1350.0	-
	90		984.4	-196.9	-1181.3	-	1237.5	-56.2	-1293.8	-
	ความชันทุกค่า	4	-	-1518.8	-1181.3	731.3	-	-1912.5	-1350.0	1096.9

* เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 1 และ 4 (หรือพื้นผิว 1E และ 4E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

** เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 5 และ 6 (หรือพื้นผิว 5E และ 6E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

ตารางที่ ค-3ข (ต่อ)

(หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร)

ความเร็วลมอ้างอิง (เมตร/วินาที)	ความชันหลังคา (องศา)	Load case	หน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับพื้นผิวของอาคารในแต่ละโซน (กรณีที่แรงลมภายในเป็นค่าบวก)							
			บริเวณกลางผนังและหลังคา				บริเวณขอบผนังและหลังคา			
			1*	2	3	5**	1E*	2E	3E	5E**
25.0	0 ถึง 5	3	51.8	-107.5	-83.6	-	77.7	-135.4	-95.6	-
	10		58.4	-107.5	-86.3	-	87.6	-135.4	-99.6	-
	15		65.1	-107.5	-89.0	-	97.6	-135.4	-103.6	-
	20		71.7	-107.5	-91.6	-	107.5	-135.4	-107.5	-
	25		70.7	-73.7	-89.6	-	97.6	-85.6	-101.6	-
	30 ถึง 45		69.7	-39.8	-87.6	-	87.6	-35.8	-95.6	-
	90		69.7	-13.9	-83.6	-	87.6	-4.0	-91.6	-
	ความชันทุกค่า	4	-	-107.5	-83.6	51.8	-	-135.4	-95.6	77.7
27.0	0 to 5	3	60.4	-125.4	-97.6	-	90.6	-158.0	-111.5	-
	10		68.1	-125.4	-100.7	-	102.2	-158.0	-116.2	-
	15		75.9	-125.4	-103.8	-	113.8	-158.0	-120.8	-
	20		83.6	-125.4	-106.9	-	125.4	-158.0	-125.4	-
	25		82.5	-86.0	-104.5	-	113.8	-99.9	-118.5	-
	30 ถึง 45		81.3	-46.5	-102.2	-	102.2	-41.8	-111.5	-
	90		81.3	-16.3	-97.6	-	102.2	-4.6	-106.9	-
	ความชันทุกค่า	4	-	-125.4	-97.6	60.4	0.0	-158.0	-111.5	90.6
29.0	0 to 5	3	69.7	-144.7	-112.6	-	104.5	-182.2	-128.6	-
	10		78.6	-144.7	-116.1	-	117.9	-182.2	-134.0	-
	15		87.5	-144.7	-119.7	-	131.3	-182.2	-139.4	-
	20		96.5	-144.7	-123.3	-	144.7	-182.2	-144.7	-
	25		95.1	-99.2	-120.6	-	131.3	-115.2	-136.7	-
	30 ถึง 45		93.8	-53.6	-117.9	-	117.9	-48.2	-128.6	-
	90		93.8	-18.8	-112.6	-	117.9	-5.4	-123.3	-
	ความชันทุกค่า	4	-	-144.7	-112.6	69.7	-	-182.2	-128.6	104.5
30.0	0 to 5	3	74.6	-154.9	-120.5	-	111.9	-195.0	-137.7	-
	10		84.1	-154.9	-124.3	-	126.2	-195.0	-143.4	-
	15		93.7	-154.9	-128.1	-	140.5	-195.0	-149.1	-
	20		103.2	-154.9	-131.9	-	154.9	-195.0	-154.9	-
	25		101.8	-106.1	-129.1	-	140.5	-123.3	-146.3	-
	30 ถึง 45		100.4	-57.4	-126.2	-	126.2	-51.6	-137.7	-
	90		100.4	-20.1	-120.5	-	126.2	-5.7	-131.9	-
	ความชันทุกค่า	4	0.0	-154.9	-120.5	74.6	-	-195.0	-137.7	111.9

* เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 1 และ 4 (หรือพื้นผิว 1E และ 4E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

** เป็นแรงลมสุทธิที่เกิดจาก หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวด้านต้นลมและท้ายลมคือพื้นผิว 5 และ 6 (หรือพื้นผิว 5E และ 6E สำหรับพื้นที่บริเวณขอบผนัง จากรูป ข.1)

ตารางที่ ค-4 ค่าปรับแก้สำหรับอาคารที่มีความสูงต่างๆ และอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศที่แตกต่างกัน

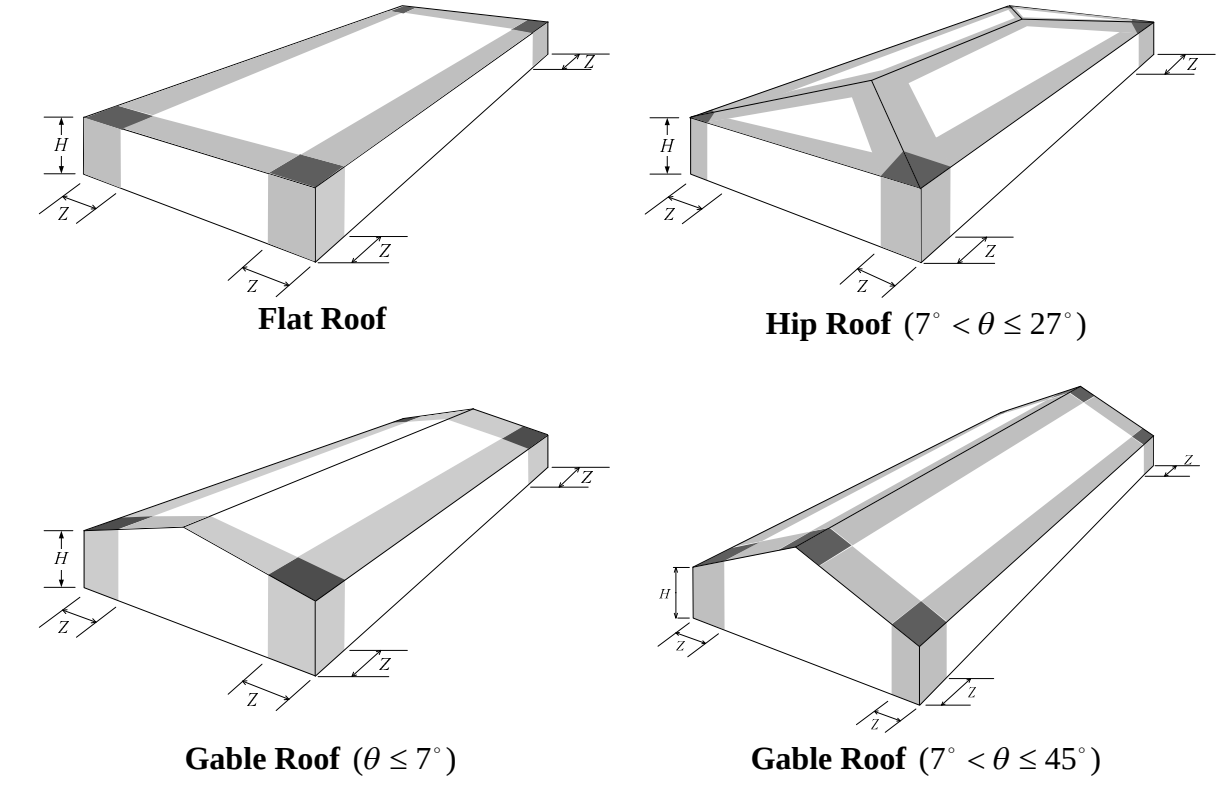
ความสูงของอาคาร, h (เมตร)	สภาพภูมิประเทศ	
	แบบ A	แบบ B
4	0.90	0.70
6	0.90	0.70
8	0.96	0.70
10	1.00	0.70
12	1.04	0.70
14	1.07	0.73
16	1.10	0.76
18	1.12	0.79
20	1.15	0.82
23	1.18	0.85

ค.2 แรงลมออกแบบสำหรับโครงสร้างรองของอาคารเตี้ย

คำอธิบายประกอบการใช้ตารางที่ ค-5 ถึง ตารางที่ ค-7

7. ค่าหน่วยแรงลมที่แสดงในตารางที่ ค-5 ถึงตารางที่ ค-7 เป็นค่าหน่วยแรงลมลัพธ์ที่กระทำกับพื้นผิวของกำแพงและหลังคาของอาคาร สำหรับใช้ออกแบบผนังและหลังคา ตลอดจนระบบโครงสร้างรองของอาคารเตี้ยที่มีความลาดชันของหลังคาค่าต่างๆ โดยได้คำนึงถึงผลของความดันลมภายนอกอาคารและความดันลมภายในอาคารแล้ว
8. ความแตกต่างของค่าหน่วยแรงลมที่แสดงในตารางที่ ค-5 ถึงตารางที่ ค-7 เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าหน่วยแรงลมภายในอาคาร ซึ่งสามารถพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมได้ดังนี้
   - ตารางที่ ค-5 ใช้สำหรับอาคารที่มีลักษณะของช่องเปิด เป็นไปตามข้อกำหนดของกรณีที่ 1 ($C_{pi} = -0.15$ ถึง 0.0 และ $C_{gi} = 2$)
   - ตารางที่ ค-6 ใช้สำหรับอาคารที่มีลักษณะของช่องเปิด เป็นไปตามข้อกำหนดของกรณีที่ 2 ($C_{pi} = -0.45$ ถึง 0.3 และ $C_{gi} = 2$)
   - ตารางที่ ค-7 ใช้สำหรับอาคารที่มีลักษณะของช่องเปิด เป็นไปตามข้อกำหนดของกรณีที่ 3 ($C_{pi} = -0.7$ ถึง 0.7 และ $C_{gi} = 2$)

9. ให้เลือกใช้ค่าหน่วยแรงลมที่เหมาะสมกับ ขนาดของพื้นที่รับลมสำหรับองค์อาคารที่ต้องการออกแบบ (effective area) ในกรณีที่ค่าขนาดของพื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ต้องการออกแบบไม่ตรงกับค่าที่กำหนดไว้ในตาราง ให้เลือกใช้ค่าหน่วยแรงลมสำหรับขนาดของพื้นที่รับลมที่เล็กกว่า
10. ค่าหน่วยแรงลมที่เป็นค่าบวก แสดงถึงแรงกระทำที่พุ่งเข้าและตั้งฉากกับพื้นผิว ส่วนค่าหน่วยแรงลมที่เป็นค่าลบแสดงถึงแรงกระทำที่พุ่งออกและตั้งฉากกับพื้นผิว
11. ค่าหน่วยแรงลมลัพธ์ที่แสดงในตารางที่ ค-5 ถึงตารางที่ ค-7 เป็นหน่วยแรงลมที่กระทำกับพื้นผิวที่อยู่ในโซนต่างๆ ของอาคาร ตามที่กำหนดในรูปที่ ค.1 (สอดคล้องกับรูป ข.2, ข.3 และ ข.5) โดยที่ความกว้าง "z" มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10% ของด้านที่แคบที่สุดและ 40% ของความสูง H ทั้งนี้ค่า "z" ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุดและไม่น้อยกว่า 1 เมตร
12. ค่าหน่วยแรงลมลัพธ์ที่แสดงในตารางที่ ค-5 ถึงตารางที่ ค-7 ใช้สำหรับอาคารที่มีความสูง 10 เมตร ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A (เปิดโล่ง) และมีค่า $I_W = 1$ สำหรับอาคารที่มีความสูงเป็นค่าอื่นหรือตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ B ให้นำค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงในตารางที่ ค-4 มาคูณเพื่อปรับค่าหน่วยแรงลมให้สอดคล้องกับลักษณะของอาคารนั้นๆ



รูปที่ ค.2 ลักษณะของอาคารและหลังคาสำหรับประกอบการใช้ตารางที่ ค-5 ถึงตารางที่ ค-7

ตารางที่ ค-5 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบผนังภายนอกอาคารและหลังคา สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A มีความสูง (h) เท่ากับ 10 เมตร และมีช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดในกรณีที่ 1 ของหน่วยแรงลมภายในอาคาร

(หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร)

หลังคา หรือ กำแพง	โซน	พื้นที่รับลม ($ม^2$)	ความเร็วลมอ้างอิง (เมตรต่อวินาที)							
			25		27		29		30	
หลังคาที่มีความชัน 0 ถึง 7 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	312.5	-722.7	364.5	-842.9	420.5	-972.4	450.0	-1040.6
		2	296.9	-671.9	346.3	-783.7	399.5	-904.1	427.5	-967.5
		5	253.9	-617.2	296.2	-719.9	341.7	-830.5	365.6	-888.8
		10	234.4	-585.9	273.4	-683.4	315.4	-788.4	337.5	-843.8
	2 (บริเวณขอบ)	1	312.5	-976.6	364.5	-1139.1	420.5	-1314.1	450.0	-1406.3
		2	296.9	-976.6	346.3	-1139.1	399.5	-1314.1	427.5	-1406.3
		5	253.9	-976.6	296.2	-1139.1	341.7	-1314.1	365.6	-1406.3
		10	234.4	-781.3	273.4	-911.3	315.4	-1051.3	337.5	-1125.0
	3 (บริเวณมุม)	1	312.5	-2109.4	364.5	-2460.4	420.5	-2838.4	450.0	-3037.5
		2	296.9	-1679.7	346.3	-1959.2	399.5	-2260.2	427.5	-2418.8
		5	253.9	-1191.4	296.2	-1389.7	341.7	-1603.2	365.6	-1715.6
		10	234.4	-781.3	273.4	-911.3	315.4	-1051.3	337.5	-1125.0
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 7 องศา แต่ไม่เกิน 27 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	429.7	-976.6	501.2	-1139.1	578.2	-1314.1	618.8	-1406.3
		2	410.2	-918.0	478.4	-1070.7	551.9	-1235.2	590.6	-1321.9
		5	351.6	-859.4	410.1	-1002.4	473.1	-1156.4	506.3	-1237.5
		10	312.5	-820.3	364.5	-956.8	420.5	-1103.8	450.0	-1181.3
	2 (บริเวณขอบ)	1	429.7	-1621.1	501.2	-1890.8	578.2	-2181.3	618.8	-2334.4
		2	410.2	-1464.8	478.4	-1708.6	551.9	-1971.1	590.6	-2109.4
		5	351.6	-1210.9	410.1	-1412.4	473.1	-1629.4	506.3	-1743.8
		10	312.5	-1035.2	364.5	-1207.4	420.5	-1392.9	450.0	-1490.6
	3 (บริเวณมุม)	1	429.7	-1953.1	501.2	-2278.1	578.2	-2628.1	618.8	-2812.5
		2	410.2	-1855.5	478.4	-2164.2	551.9	-2496.7	590.6	-2671.9
		5	351.6	-1699.2	410.1	-1982.0	473.1	-2286.5	506.3	-2446.9
		10	312.5	-1562.5	364.5	-1822.5	420.5	-2102.5	450.0	-2250.0
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 27 องศาแต่ไม่เกิน 45 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	742.2	-703.1	865.7	-820.1	998.7	-946.1	1068.8	-1012.5
		2	722.7	-683.6	842.9	-797.3	972.4	-919.8	1040.6	-984.4
		5	703.1	-644.5	820.1	-751.8	946.1	-867.3	1012.5	-928.1
		10	683.6	-605.5	797.3	-706.2	919.8	-814.7	984.4	-871.9
	2 (บริเวณขอบ)	1	742.2	-820.3	865.7	-956.8	998.7	-1103.8	1068.8	-1181.3
		2	722.7	-781.3	842.9	-911.3	972.4	-1051.3	1040.6	-1125.0
		5	703.1	-761.7	820.1	-888.5	946.1	-1025.0	1012.5	-1096.9
		10	683.6	-742.2	797.3	-865.7	919.8	-998.7	984.4	-1068.8
	3 (บริเวณมุม)	1	742.2	-820.3	865.7	-956.8	998.7	-1103.8	1068.8	-1181.3
		2	722.7	-781.3	842.9	-911.3	972.4	-1051.3	1040.6	-1125.0
		5	703.1	-761.7	820.1	-888.5	946.1	-1025.0	1012.5	-1096.9
		10	683.6	-742.2	797.3	-865.7	919.8	-998.7	984.4	-1068.8
กำแพง	4 (บริเวณกลาง)	1	800.8	-703.1	934.0	-820.1	1077.5	-946.1	1153.1	-1012.5
		2	765.6	-691.4	893.0	-806.5	1030.2	-930.4	1102.5	-995.6
		5	730.5	-652.3	852.0	-760.9	982.9	-877.8	1051.9	-939.4
		10	703.1	-636.7	820.1	-742.7	946.1	-856.8	1012.5	-916.9
		20	664.1	-609.4	774.6	-710.8	893.6	-820.0	956.3	-877.5
		50	632.8	-585.9	738.1	-683.4	851.5	-788.4	911.3	-843.8
	5 (บริเวณขอบ)	1	800.8	-820.3	934.0	-956.8	1077.5	-1103.8	1153.1	-1181.3
		2	765.6	-781.3	893.0	-911.3	1030.2	-1051.3	1102.5	-1125.0
		5	730.5	-718.8	852.0	-838.4	982.9	-967.2	1051.9	-1035.0
		10	664.1	-636.7	774.6	-742.7	893.6	-856.8	956.3	-916.9
		20	664.1	-636.7	774.6	-742.7	893.6	-856.8	956.3	-916.9
		50	632.8	-585.9	738.1	-683.4	851.5	-788.4	911.3	-843.8

ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

(หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร)

หลังคา หรือ กำแพง	โซน	พื้นที่รับลม ($ม^2$)	ความเร็วลมอ้างอิง (เมตรต่อวินาที)							
			25		27		29		30	
หลังคาที่มีความชัน 0 ถึง 7 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	31.9	-73.7	37.2	-86.0	42.9	-99.2	45.9	-106.1
		2	30.3	-68.5	35.3	-79.9	40.7	-92.2	43.6	-98.7
		5	25.9	-62.9	30.2	-73.4	34.8	-84.7	37.3	-90.6
		10	23.9	-59.8	27.9	-69.7	32.2	-80.4	34.4	-86.0
	2 (บริเวณขอบ)	1	31.9	-99.6	37.2	-116.2	42.9	-134.0	45.9	-143.4
		2	30.3	-99.6	35.3	-116.2	40.7	-134.0	43.6	-143.4
		5	25.9	-99.6	30.2	-116.2	34.8	-134.0	37.3	-143.4
		10	23.9	-79.7	27.9	-92.9	32.2	-107.2	34.4	-114.7
	3 (บริเวณมุม)	1	31.9	-215.1	37.2	-250.9	42.9	-289.5	45.9	-309.8
		2	30.3	-171.3	35.3	-199.8	40.7	-230.5	43.6	-246.7
		5	25.9	-121.5	30.2	-141.7	34.8	-163.5	37.3	-175.0
		10	23.9	-79.7	27.9	-92.9	32.2	-107.2	34.4	-114.7
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 7 องศา แต่ไม่เกิน 27 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	43.8	-99.6	51.1	-116.2	59.0	-134.0	63.1	-143.4
		2	41.8	-93.6	48.8	-109.2	56.3	-126.0	60.2	-134.8
		5	35.9	-87.6	41.8	-102.2	48.2	-117.9	51.6	-126.2
		10	31.9	-83.7	37.2	-97.6	42.9	-112.6	45.9	-120.5
	2 (บริเวณขอบ)	1	43.8	-165.3	51.1	-192.8	59.0	-222.4	63.1	-238.1
		2	41.8	-149.4	48.8	-174.2	56.3	-201.0	60.2	-215.1
		5	35.9	-123.5	41.8	-144.0	48.2	-166.2	51.6	-177.8
		10	31.9	-105.6	37.2	-123.1	42.9	-142.0	45.9	-152.0
	3 (บริเวณมุม)	1	43.8	-199.2	51.1	-232.3	59.0	-268.0	63.1	-286.8
		2	41.8	-189.2	48.8	-220.7	56.3	-254.6	60.2	-272.5
		5	35.9	-173.3	41.8	-202.1	48.2	-233.2	51.6	-249.5
		10	31.9	-159.3	37.2	-185.9	42.9	-214.4	45.9	-229.5
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 27 องศาแต่ไม่เกิน 45 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	75.7	-71.7	88.3	-83.6	101.8	-96.5	109.0	-103.3
		2	73.7	-69.7	86.0	-81.3	99.2	-93.8	106.1	-100.4
		5	71.7	-65.7	83.6	-76.7	96.5	-88.4	103.3	-94.6
		10	69.7	-61.7	81.3	-72.0	93.8	-83.1	100.4	-88.9
	2 (บริเวณขอบ)	1	75.7	-83.7	88.3	-97.6	101.8	-112.6	109.0	-120.5
		2	73.7	-79.7	86.0	-92.9	99.2	-107.2	106.1	-114.7
		5	71.7	-77.7	83.6	-90.6	96.5	-104.5	103.3	-111.9
		10	69.7	-75.7	81.3	-88.3	93.8	-101.8	100.4	-109.0
	3 (บริเวณมุม)	1	75.7	-83.7	88.3	-97.6	101.8	-112.6	109.0	-120.5
		2	73.7	-79.7	86.0	-92.9	99.2	-107.2	106.1	-114.7
		5	71.7	-77.7	83.6	-90.6	96.5	-104.5	103.3	-111.9
		10	69.7	-75.7	81.3	-88.3	93.8	-101.8	100.4	-109.0
กำแพง	4 (บริเวณกลาง)	1	81.7	-71.7	95.3	-83.6	109.9	-96.5	117.6	-103.3
		2	78.1	-70.5	91.1	-82.2	105.1	-94.9	112.4	-101.5
		5	74.5	-66.5	86.9	-77.6	100.2	-89.5	107.3	-95.8
		10	71.7	-64.9	83.6	-75.7	96.5	-87.4	103.3	-93.5
		20	67.7	-62.1	79.0	-72.5	91.1	-83.6	97.5	-89.5
		50	64.5	-59.8	75.3	-69.7	86.8	-80.4	92.9	-86.0
	5 (บริเวณขอบ)	1	81.7	-83.7	95.3	-97.6	109.9	-112.6	117.6	-120.5
		2	78.1	-79.7	91.1	-92.9	105.1	-107.2	112.4	-114.7
		5	74.5	-73.3	86.9	-85.5	100.2	-98.6	107.3	-105.5
		10	67.7	-64.9	79.0	-75.7	91.1	-87.4	97.5	-93.5
		20	67.7	-64.9	79.0	-75.7	91.1	-87.4	97.5	-93.5
		50	64.5	-59.8	75.3	-69.7	86.8	-80.4	92.9	-86.0

ตารางที่ ค-6 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบผนังภายนอกอาคารและหลังคา สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A มีความสูง (h) เท่ากับ 10 เมตร และมีช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดในกรณีที่ 2 ของหน่วยแรงลมภายในอาคาร

(มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร)

หลังคา หรือ กำแพง	โซน	พื้นที่รับลม ($ม^2$)	ความเร็วลมอ้างอิง (เมตรต่อวินาที)							
			25		27		29		30	
หลังคาที่มีความชัน 0 ถึง 7 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	546.9	-957.0	637.9	-1116.3	735.9	-1287.8	787.5	-1378.1
		2	531.3	-906.3	619.7	-1057.1	714.9	-1219.5	765.0	-1305.0
		5	488.3	-851.6	569.5	-993.3	657.0	-1145.9	703.1	-1226.3
		10	468.8	-820.3	546.8	-956.8	630.8	-1103.8	675.0	-1181.3
	2 (บริเวณขอบ)	1	546.9	-1210.9	637.9	-1412.4	735.9	-1629.4	787.5	-1743.8
		2	531.3	-1210.9	619.7	-1412.4	714.9	-1629.4	765.0	-1743.8
		5	488.3	-1210.9	569.5	-1412.4	657.0	-1629.4	703.1	-1743.8
		10	468.8	-1015.6	546.8	-1184.6	630.8	-1366.6	675.0	-1462.5
	3 (บริเวณมุม)	1	546.9	-2343.8	637.9	-2733.8	735.9	-3153.8	787.5	-3375.0
		2	531.3	-1914.1	619.7	-2232.6	714.9	-2575.6	765.0	-2756.3
		5	488.3	-1425.8	569.5	-1663.0	657.0	-1918.5	703.1	-2053.1
		10	468.8	-1015.6	546.8	-1184.6	630.8	-1366.6	675.0	-1462.5
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 7 องศา แต่ไม่เกิน 27 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	664.1	-1210.9	774.6	-1412.4	893.6	-1629.4	956.3	-1743.8
		2	644.5	-1152.3	751.8	-1344.1	867.3	-1550.6	928.1	-1659.4
		5	585.9	-1093.8	683.4	-1275.8	788.4	-1471.8	843.8	-1575.0
		10	546.9	-1054.7	637.9	-1230.2	735.9	-1419.2	787.5	-1518.8
	2 (บริเวณขอบ)	1	664.1	-1855.5	774.6	-2164.2	893.6	-2496.7	956.3	-2671.9
		2	644.5	-1699.2	751.8	-1982.0	867.3	-2286.5	928.1	-2446.9
		5	585.9	-1445.3	683.4	-1685.8	788.4	-1944.8	843.8	-2081.3
		10	546.9	-1269.5	637.9	-1480.8	735.9	-1708.3	787.5	-1828.1
	3 (บริเวณมุม)	1	664.1	-2187.5	774.6	-2551.5	893.6	-2943.5	956.3	-3150.0
		2	644.5	-2089.8	751.8	-2437.6	867.3	-2812.1	928.1	-3009.4
		5	585.9	-1933.6	683.4	-2255.3	788.4	-2601.8	843.8	-2784.4
		10	546.9	-1796.9	637.9	-2095.9	735.9	-2417.9	787.5	-2587.5
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 27 องศาแต่ไม่เกิน 45 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	976.6	-937.5	1139.1	-1093.5	1314.1	-1261.5	1406.3	-1350.0
		2	957.0	-918.0	1116.3	-1070.7	1287.8	-1235.2	1378.1	-1321.9
		5	937.5	-878.9	1093.5	-1025.2	1261.5	-1182.7	1350.0	-1265.6
		10	918.0	-839.8	1070.7	-979.6	1235.2	-1130.1	1321.9	-1209.4
	2 (บริเวณขอบ)	1	976.6	-1054.7	1139.1	-1230.2	1314.1	-1419.2	1406.3	-1518.8
		2	957.0	-1015.6	1116.3	-1184.6	1287.8	-1366.6	1378.1	-1462.5
		5	937.5	-996.1	1093.5	-1161.8	1261.5	-1340.3	1350.0	-1434.4
		10	918.0	-976.6	1070.7	-1139.1	1235.2	-1314.1	1321.9	-1406.3
	3 (บริเวณมุม)	1	976.6	-1054.7	1139.1	-1230.2	1314.1	-1419.2	1406.3	-1518.8
		2	957.0	-1015.6	1116.3	-1184.6	1287.8	-1366.6	1378.1	-1462.5
		5	937.5	-996.1	1093.5	-1161.8	1261.5	-1340.3	1350.0	-1434.4
		10	918.0	-976.6	1070.7	-1139.1	1235.2	-1314.1	1321.9	-1406.3
กำแพง	4 (บริเวณกลาง)	1	1035.2	-937.5	1207.4	-1093.5	1392.9	-1261.5	1490.6	-1350.0
		2	1000.0	-925.8	1166.4	-1079.8	1345.6	-1245.7	1440.0	-1333.1
		5	964.8	-886.7	1125.4	-1034.3	1298.3	-1193.2	1389.4	-1276.9
		10	937.5	-871.1	1093.5	-1016.0	1261.5	-1172.1	1350.0	-1254.4
		20	898.4	-843.8	1047.9	-984.2	1208.9	-1135.4	1293.8	-1215.0
		50	867.2	-820.3	1011.5	-956.8	1166.9	-1103.8	1248.8	-1181.3
	5 (บริเวณขอบ)	1	1035.2	-1054.7	1207.4	-1230.2	1392.9	-1419.2	1490.6	-1518.8
		2	1000.0	-1015.6	1166.4	-1184.6	1345.6	-1366.6	1440.0	-1462.5
		5	964.8	-953.1	1125.4	-1111.7	1298.3	-1282.5	1389.4	-1372.5
		10	898.4	-871.1	1047.9	-1016.0	1208.9	-1172.1	1293.8	-1254.4
		20	898.4	-871.1	1047.9	-1016.0	1208.9	-1172.1	1293.8	-1254.4
		50	867.2	-820.3	1011.5	-956.8	1166.9	-1103.8	1248.8	-1181.3

ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

(หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร)

หลังคา หรือ กำแพง	โซน	พื้นที่รับลม ($ม^2$)	ความเร็วลมอ้างอิง (เมตรต่อวินาที)							
			25		27		29		30	
หลังคาที่มีความชัน 0 ถึง 7 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	55.8	-97.6	65.0	-113.8	75.0	-131.3	80.3	-140.5
		2	54.2	-92.4	63.2	-107.8	72.9	-124.4	78.0	-133.1
		5	49.8	-86.8	58.1	-101.3	67.0	-116.9	71.7	-125.1
		10	47.8	-83.7	55.8	-97.6	64.3	-112.6	68.8	-120.5
	2 (บริเวณขอบ)	1	55.8	-123.5	65.0	-144.0	75.0	-166.2	80.3	-177.8
		2	54.2	-123.5	63.2	-144.0	72.9	-166.2	78.0	-177.8
		5	49.8	-123.5	58.1	-144.0	67.0	-166.2	71.7	-177.8
		10	47.8	-103.6	55.8	-120.8	64.3	-139.4	68.8	-149.1
	3 (บริเวณมุม)	1	55.8	-239.0	65.0	-278.8	75.0	-321.6	80.3	-344.2
		2	54.2	-195.2	63.2	-227.7	72.9	-262.7	78.0	-281.1
		5	49.8	-145.4	58.1	-169.6	67.0	-195.6	71.7	-209.4
		10	47.8	-103.6	55.8	-120.8	64.3	-139.4	68.8	-149.1
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 7 องศา แต่ไม่เกิน 27 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	67.7	-123.5	79.0	-144.0	91.1	-166.2	97.5	-177.8
		2	65.7	-117.5	76.7	-137.1	88.4	-158.1	94.6	-169.2
		5	59.8	-111.5	69.7	-130.1	80.4	-150.1	86.0	-160.6
		10	55.8	-107.6	65.0	-125.5	75.0	-144.7	80.3	-154.9
	2 (บริเวณขอบ)	1	67.7	-189.2	79.0	-220.7	91.1	-254.6	97.5	-272.5
		2	65.7	-173.3	76.7	-202.1	88.4	-233.2	94.6	-249.5
		5	59.8	-147.4	69.7	-171.9	80.4	-198.3	86.0	-212.2
		10	55.8	-129.5	65.0	-151.0	75.0	-174.2	80.3	-186.4
	3 (บริเวณมุม)	1	67.7	-223.1	79.0	-260.2	91.1	-300.2	97.5	-321.2
		2	65.7	-213.1	76.7	-248.6	88.4	-286.8	94.6	-306.9
		5	59.8	-197.2	69.7	-230.0	80.4	-265.3	86.0	-283.9
		10	55.8	-183.2	65.0	-213.7	75.0	-246.6	80.3	-263.9
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 27 องศาแต่ไม่เกิน 45 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	99.6	-95.6	116.2	-111.5	134.0	-128.6	143.4	-137.7
		2	97.6	-93.6	113.8	-109.2	131.3	-126.0	140.5	-134.8
		5	95.6	-89.6	111.5	-104.5	128.6	-120.6	137.7	-129.1
		10	93.6	-85.6	109.2	-99.9	126.0	-115.2	134.8	-123.3
	2 (บริเวณขอบ)	1	99.6	-107.6	116.2	-125.5	134.0	-144.7	143.4	-154.9
		2	97.6	-103.6	113.8	-120.8	131.3	-139.4	140.5	-149.1
		5	95.6	-101.6	111.5	-118.5	128.6	-136.7	137.7	-146.3
		10	93.6	-99.6	109.2	-116.2	126.0	-134.0	134.8	-143.4
	3 (บริเวณมุม)	1	99.6	-107.6	116.2	-125.5	134.0	-144.7	143.4	-154.9
		2	97.6	-103.6	113.8	-120.8	131.3	-139.4	140.5	-149.1
		5	95.6	-101.6	111.5	-118.5	128.6	-136.7	137.7	-146.3
		10	93.6	-99.6	109.2	-116.2	126.0	-134.0	134.8	-143.4
กำแพง	4 (บริเวณกลาง)	1	105.6	-95.6	123.1	-111.5	142.0	-128.6	152.0	-137.7
		2	102.0	-94.4	118.9	-110.1	137.2	-127.0	146.8	-135.9
		5	98.4	-90.4	114.8	-105.5	132.4	-121.7	141.7	-130.2
		10	95.6	-88.8	111.5	-103.6	128.6	-119.5	137.7	-127.9
		20	91.6	-86.0	106.9	-100.4	123.3	-115.8	131.9	-123.9
		50	88.4	-83.7	103.1	-97.6	119.0	-112.6	127.3	-120.5
	5 (บริเวณขอบ)	1	105.6	-107.6	123.1	-125.5	142.0	-144.7	152.0	-154.9
		2	102.0	-103.6	118.9	-120.8	137.2	-139.4	146.8	-149.1
		5	98.4	-97.2	114.8	-113.4	132.4	-130.8	141.7	-140.0
		10	91.6	-88.8	106.9	-103.6	123.3	-119.5	131.9	-127.9
		20	91.6	-88.8	106.9	-103.6	123.3	-119.5	131.9	-127.9
		50	88.4	-83.7	103.1	-97.6	119.0	-112.6	127.3	-120.5

ตารางที่ ค-7 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบผนังภายนอกอาคารและหลังคา สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ A มีความสูง (h) เท่ากับ 10 เมตร และมีช่องเปิดเป็นไปตามข้อกำหนดในกรณีที่ 3 ของหน่วยแรงลมภายในอาคาร

(มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร)

หลังคา หรือ กำแพง	โซน	พื้นที่รับลม ($ม^2$)	ความเร็วลมอ้างอิง (เมตรต่อวินาที)							
			25		27		29		30	
หลังคาที่มีความชัน 0 ถึง 7 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	742.2	-1269.5	865.7	-1480.8	998.7	-1708.3	1068.8	-1828.1
		2	726.6	-1218.8	847.5	-1421.6	977.7	-1640.0	1046.3	-1755.0
		5	683.6	-1164.1	797.3	-1357.8	919.8	-1566.4	984.4	-1676.3
		10	664.1	-1132.8	774.6	-1321.3	893.6	-1524.3	956.3	-1631.3
	2 (บริเวณขอบ)	1	742.2	-1523.4	865.7	-1776.9	998.7	-2049.9	1068.8	-2193.8
		2	726.6	-1523.4	847.5	-1776.9	977.7	-2049.9	1046.3	-2193.8
		5	683.6	-1523.4	797.3	-1776.9	919.8	-2049.9	984.4	-2193.8
		10	664.1	-1328.1	774.6	-1549.1	893.6	-1787.1	956.3	-1912.5
	3 (บริเวณมุม)	1	742.2	-2656.3	865.7	-3098.3	998.7	-3574.3	1068.8	-3825.0
		2	726.6	-2226.6	847.5	-2597.1	977.7	-2996.1	1046.3	-3206.3
		5	683.6	-1738.3	797.3	-2027.5	919.8	-2339.0	984.4	-2503.1
		10	664.1	-1328.1	774.6	-1549.1	893.6	-1787.1	956.3	-1912.5
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 7 องศา แต่ไม่เกิน 27 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	859.4	-1523.4	1002.4	-1776.9	1156.4	-2049.9	1237.5	-2193.8
		2	839.8	-1464.8	979.6	-1708.6	1130.1	-1971.1	1209.4	-2109.4
		5	781.3	-1406.3	911.3	-1640.3	1051.3	-1892.3	1125.0	-2025.0
		10	742.2	-1367.2	865.7	-1594.7	998.7	-1839.7	1068.8	-1968.8
	2 (บริเวณขอบ)	1	859.4	-2168.0	1002.4	-2528.7	1156.4	-2917.2	1237.5	-3121.9
		2	839.8	-2011.7	979.6	-2346.5	1130.1	-2707.0	1209.4	-2896.9
		5	781.3	-1757.8	911.3	-2050.3	1051.3	-2365.3	1125.0	-2531.3
		10	742.2	-1582.0	865.7	-1845.3	998.7	-2128.8	1068.8	-2278.1
	3 (บริเวณมุม)	1	859.4	-2500.0	1002.4	-2916.0	1156.4	-3364.0	1237.5	-3600.0
		2	839.8	-2402.3	979.6	-2802.1	1130.1	-3232.6	1209.4	-3459.4
		5	781.3	-2246.1	911.3	-2619.8	1051.3	-3022.3	1125.0	-3234.4
		10	742.2	-2109.4	865.7	-2460.4	998.7	-2838.4	1068.8	-3037.5
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 27 องศาแต่ไม่เกิน 45 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	1171.9	-1250.0	1366.9	-1458.0	1576.9	-1682.0	1687.5	-1800.0
		2	1152.3	-1230.5	1344.1	-1435.2	1550.6	-1655.7	1659.4	-1771.9
		5	1132.8	-1191.4	1321.3	-1389.7	1524.3	-1603.2	1631.3	-1715.6
		10	1113.3	-1152.3	1298.5	-1344.1	1498.0	-1550.6	1603.1	-1659.4
	2 (บริเวณขอบ)	1	1171.9	-1367.2	1366.9	-1594.7	1576.9	-1839.7	1687.5	-1968.8
		2	1152.3	-1328.1	1344.1	-1549.1	1550.6	-1787.1	1659.4	-1912.5
		5	1132.8	-1308.6	1321.3	-1526.3	1524.3	-1760.8	1631.3	-1884.4
		10	1113.3	-1289.1	1298.5	-1503.6	1498.0	-1734.6	1603.1	-1856.3
	3 (บริเวณมุม)	1	1171.9	-1367.2	1366.9	-1594.7	1576.9	-1839.7	1687.5	-1968.8
		2	1152.3	-1328.1	1344.1	-1549.1	1550.6	-1787.1	1659.4	-1912.5
		5	1132.8	-1308.6	1321.3	-1526.3	1524.3	-1760.8	1631.3	-1884.4
		10	1113.3	-1289.1	1298.5	-1503.6	1498.0	-1734.6	1603.1	-1856.3
กำแพง	4 (บริเวณกลาง)	1	1230.5	-1250.0	1435.2	-1458.0	1655.7	-1682.0	1771.9	-1800.0
		2	1195.3	-1238.3	1394.2	-1444.3	1608.4	-1666.2	1721.3	-1783.1
		5	1160.2	-1199.2	1353.2	-1398.8	1561.1	-1613.7	1670.6	-1726.9
		10	1132.8	-1183.6	1321.3	-1380.5	1524.3	-1592.6	1631.3	-1704.4
		20	1093.8	-1156.3	1275.8	-1348.7	1471.8	-1555.9	1575.0	-1665.0
		50	1062.5	-1132.8	1239.3	-1321.3	1429.7	-1524.3	1530.0	-1631.3
	5 (บริเวณขอบ)	1	1230.5	-1367.2	1435.2	-1594.7	1655.7	-1839.7	1771.9	-1968.8
		2	1195.3	-1328.1	1394.2	-1549.1	1608.4	-1787.1	1721.3	-1912.5
		5	1160.2	-1265.6	1353.2	-1476.2	1561.1	-1703.0	1670.6	-1822.5
		10	1093.8	-1183.6	1275.8	-1380.5	1471.8	-1592.6	1575.0	-1704.4
		20	1093.8	-1183.6	1275.8	-1380.5	1471.8	-1592.6	1575.0	-1704.4
		50	1062.5	-1132.8	1239.3	-1321.3	1429.7	-1524.3	1530.0	-1631.3

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

(หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร)

หลังคา หรือ กำแพง	โซน	พื้นที่รับลม ($ม^2$)	ความเร็วลมอ้างอิง (เมตรต่อวินาที)							
			25		27		29		30	
หลังคาที่มีความชัน 0 ถึง 7 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	75.7	-129.5	88.3	-151.0	101.8	-174.2	109.0	-186.4
		2	74.1	-124.3	86.4	-145.0	99.7	-167.2	106.7	-179.0
		5	69.7	-118.7	81.3	-138.5	93.8	-159.7	100.4	-170.9
		10	67.7	-115.5	79.0	-134.7	91.1	-155.4	97.5	-166.4
	2 (บริเวณขอบ)	1	75.7	-155.4	88.3	-181.2	101.8	-209.0	109.0	-223.7
		2	74.1	-155.4	86.4	-181.2	99.7	-209.0	106.7	-223.7
		5	69.7	-155.4	81.3	-181.2	93.8	-209.0	100.4	-223.7
		10	67.7	-135.4	79.0	-158.0	91.1	-182.2	97.5	-195.0
	3 (บริเวณมุม)	1	75.7	-270.9	88.3	-316.0	101.8	-364.5	109.0	-390.1
		2	74.1	-227.1	86.4	-264.8	99.7	-305.5	106.7	-327.0
		5	69.7	-177.3	81.3	-206.8	93.8	-238.5	100.4	-255.3
		10	67.7	-135.4	79.0	-158.0	91.1	-182.2	97.5	-195.0
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 7 องศา แต่ไม่เกิน 27 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	87.6	-155.4	102.2	-181.2	117.9	-209.0	126.2	-223.7
		2	85.6	-149.4	99.9	-174.2	115.2	-201.0	123.3	-215.1
		5	79.7	-143.4	92.9	-167.3	107.2	-193.0	114.7	-206.5
		10	75.7	-139.4	88.3	-162.6	101.8	-187.6	109.0	-200.8
	2 (บริเวณขอบ)	1	87.6	-221.1	102.2	-257.9	117.9	-297.5	126.2	-318.4
		2	85.6	-205.2	99.9	-239.3	115.2	-276.1	123.3	-295.4
		5	79.7	-179.3	92.9	-209.1	107.2	-241.2	114.7	-258.1
		10	75.7	-161.3	88.3	-188.2	101.8	-217.1	109.0	-232.3
	3 (บริเวณมุม)	1	87.6	-254.9	102.2	-297.4	117.9	-343.1	126.2	-367.1
		2	85.6	-245.0	99.9	-285.8	115.2	-329.7	123.3	-352.8
		5	79.7	-229.1	92.9	-267.2	107.2	-308.2	114.7	-329.8
		10	75.7	-215.1	88.3	-250.9	101.8	-289.5	109.0	-309.8
หลังคาที่มีความชันมากกว่า 27 องศาแต่ไม่เกิน 45 องศา	1 (บริเวณกลาง)	1	119.5	-127.5	139.4	-148.7	160.8	-171.5	172.1	-183.6
		2	117.5	-125.5	137.1	-146.4	158.1	-168.8	169.2	-180.7
		5	115.5	-121.5	134.7	-141.7	155.4	-163.5	166.4	-175.0
		10	113.5	-117.5	132.4	-137.1	152.8	-158.1	163.5	-169.2
	2 (บริเวณขอบ)	1	119.5	-139.4	139.4	-162.6	160.8	-187.6	172.1	-200.8
		2	117.5	-135.4	137.1	-158.0	158.1	-182.2	169.2	-195.0
		5	115.5	-133.4	134.7	-155.7	155.4	-179.6	166.4	-192.2
		10	113.5	-131.5	132.4	-153.3	152.8	-176.9	163.5	-189.3
	3 (บริเวณมุม)	1	119.5	-139.4	139.4	-162.6	160.8	-187.6	172.1	-200.8
		2	117.5	-135.4	137.1	-158.0	158.1	-182.2	169.2	-195.0
		5	115.5	-133.4	134.7	-155.7	155.4	-179.6	166.4	-192.2
		10	113.5	-131.5	132.4	-153.3	152.8	-176.9	163.5	-189.3
กำแพง	4 (บริเวณกลาง)	1	125.5	-127.5	146.4	-148.7	168.8	-171.5	180.7	-183.6
		2	121.9	-126.3	142.2	-147.3	164.0	-169.9	175.5	-181.8
		5	118.3	-122.3	138.0	-142.6	159.2	-164.6	170.4	-176.1
		10	115.5	-120.7	134.7	-140.8	155.4	-162.4	166.4	-173.8
		20	111.5	-117.9	130.1	-137.5	150.1	-158.7	160.6	-169.8
		50	108.4	-115.5	126.4	-134.7	145.8	-155.4	156.0	-166.4
	5 (บริเวณขอบ)	1	125.5	-139.4	146.4	-162.6	168.8	-187.6	180.7	-200.8
		2	121.9	-135.4	142.2	-158.0	164.0	-182.2	175.5	-195.0
		5	118.3	-129.1	138.0	-150.5	159.2	-173.7	170.4	-185.9
		10	111.5	-120.7	130.1	-140.8	150.1	-162.4	160.6	-173.8
		20	111.5	-120.7	130.1	-140.8	150.1	-162.4	160.6	-173.8
		50	108.4	-115.5	126.4	-134.7	145.8	-155.4	156.0	-166.4

ส่วนที่ 2
คำอธิบายมาตรฐาน

คำอธิบายมาตรฐานไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐาน แต่มีวัตถุประสงค์นอกจากเป็นคำอธิบายมาตรฐานแล้วยังประกอบด้วยข้อมูลเพิ่มเติม เพื่อให้ผู้ใช้มีความเข้าใจในการใช้มาตรฐานได้ดียิ่งขึ้น

หมายเลขหัวข้อในคำอธิบายมาตรฐาน ใช้ตามในมาตรฐาน และเนื่องจากคำอธิบายจะเลือกเฉพาะหัวข้อที่มีความจำเป็น ดังนั้น หมายเลขหัวข้อในคำอธิบายจึงมีไม่ครบถ้วน

คำอธิบายบทที่ 1

ทั่วไป

1.3 ข้อพิจารณาหลักของการออกแบบ และ

1.4 วิธีคำนวณแรงลมร่วมกับน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ

วัตถุประสงค์หลักของการออกแบบอาคารต้านทานแรงลม มี 2 ประการ คือ (1) เพื่อให้อาคารนั้นมีความปลอดภัย แม้ในกรณีที่มีพายุรุนแรงที่โอกาสเกิดขึ้นน้อยมากพัดเข้ามาปะทะอาคาร และ (2) เพื่อให้อาคารสามารถใช้งานได้เป็นปกติ ในสภาพลมแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อยครั้งในช่วงอายุการใช้งานของอาคารนั้นๆ

เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ 1 ผู้ออกแบบจำเป็นต้องออกแบบให้อาคารมีโครงสร้างและส่วนประกอบที่แข็งแรง สามารถต้านทานแรงลมที่กระทำร่วมกับน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ ในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างปลอดภัย เป็นไปตามข้อพิจารณา 1.3 (ก)

สำหรับการออกแบบอาคารเพื่อให้สามารถใช้งานอาคารได้เมื่อเกิดลมแรงตามวัตถุประสงค์ที่ 2 มาตรฐานได้กำหนดให้ใช้ค่าความเร็วลมที่ต่ำกว่าความเร็วลมอ้างอิงในการวิเคราะห์คำนวณหาผลกระทบจากแรงลม โดยปรับลดค่าความเร็วลมอ้างอิงด้วยค่าประกอบความสำคัญ (I_w) ที่มีค่าเท่ากับ 0.75 (ตารางที่ 2-2 ในหัวข้อ 2.2) ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วลมอ้างอิงที่กำหนดในมาตรฐานฉบับนี้เป็น ค่าความเร็วลมที่มีคาบเวลากลับ (return period) เท่ากับ 50 ปีโดยประมาณ ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมที่มีโอกาสเกิดได้เพียง 1-2 ครั้งโดยเฉลี่ย ในช่วงอายุการใช้งานของอาคาร แต่เมื่อนำความเร็วลมอ้างอิงไปคูณกับ I_w ที่มีค่าเท่ากับ 0.75 จะได้ค่าความเร็วลมที่ต่ำลงและมีคาบเวลากลับสั้นลงคือประมาณ 10-15 ปี ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อยครั้งในช่วงอายุการใช้งานของอาคาร สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ 2 ของการออกแบบ ดังนั้น มาตรฐานจึงได้กำหนดให้ใช้ค่าความเร็วที่ปรับลดลงนี้ในการคำนวณหาค่าการโก่งตัวด้านข้างของอาคาร และการสั่นไหวของอาคาร และผลการคำนวณจะต้องเป็นไปตามข้อพิจารณา 1.3(ข) และ (ค)

ในการออกแบบเพื่อให้อาคารมีความปลอดภัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ 1 ผู้ออกแบบสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ วิธีกำลัง และวิธีหน่วยแรงใช้งาน แต่ในปัจจุบันมาตรฐานในหลายๆ ประเทศได้เน้นความสำคัญของวิธีกำลัง และในขณะเดียวกันค่อยๆ ลดความสำคัญของวิธีหน่วยแรงใช้งานโดยให้เป็นเพียงทางเลือกในการออกแบบ ที่เป็นเช่นนี้เพราะ วิธีกำลังส่งผลให้อาคารที่ได้รับ

การออกแบบมีระดับความปลอดภัย (ภายใต้สภาวะแรงกระทำต่างๆ) ที่สม่ำเสมอกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน

ข้อกำหนดในการออกแบบด้วยวิธีกำลัง มีรูปแบบดังนี้:

กำลังต้านทานที่คูณด้วยตัวคูณลดกำลัง (ϕ) $\geq$ แรงภายในโครงสร้างอาคารที่เกิดจากผลรวมของแรงกระทำที่คูณด้วยตัวคูณแรง

การรวมแรงกระทำที่คูณด้วยตัวคูณแรงนั้นมีหลายรูปแบบ โดยที่ แต่ละรูปแบบจะเป็นตัวแทนของสภาวะวิกฤติที่อาจเกิดขึ้นได้จริง (แม้ว่าจะมีโอกาสเกิดน้อยมาก)

คำอธิบาย บทที่ 2

การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างง่าย

2.2 แรงลมออกแบบ

ขั้นตอนการคำนวณแรงลม สำหรับโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม โครงสร้างรอง และผนังภายนอก โดยวิธีการอย่างง่าย และวิธีการอย่างละเอียด แสดงในรูปที่ อ.2.1

2.3 หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม

ก. ความเร็วลมอ้างอิง

หน่วยแรงลมที่คำนวณจากค่าความเร็วลมอ้างอิงที่กำหนดจะควบคุมอาคารให้มีความปลอดภัยเพียงพอทั้งที่สภาวะจำกัดด้านใช้งานและที่สภาวะจำกัดด้านกำลัง หลักการในการกำหนดค่าความเร็วลมอ้างอิงนั้นพิจารณาจากลักษณะและพฤติกรรมของลมที่มีอิทธิพลในแต่ละพื้นที่ของประเทศ โดยความเร็วลมอ้างอิงของพื้นที่ทางภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือถูกกำหนดขึ้นจากอิทธิพลของพายุฤดูร้อนและลมมรสุมประจำปี ส่วนภาคใต้นั้นเป็นพื้นที่เสี่ยงต่ออิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อนจึงพิจารณากำหนดความเร็วลมอ้างอิงที่สภาวะจำกัดด้านใช้งานจากอิทธิพลของลมมรสุมประจำปี แต่พิจารณากำหนดความเร็วลมอ้างอิงที่สภาวะจำกัดด้านกำลังจากอิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อนผ่านทางตัวประกอบไต้ฝุ่น

พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศยกเว้นภาคใต้นั้น ค่าความเร็วลมอ้างอิงจะมีคาบเวลากลับประมาณ 50 ปี เมื่อนำค่าความเร็วลมที่กำหนดไปคำนวณหน่วยแรงลมในการออกแบบจะได้ว่า ที่สภาวะจำกัดด้านการใช้งานซึ่งมีค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคารเท่ากับ 0.75 หน่วยแรงลมในการออกแบบจะมีคาบเวลากลับประมาณ 15-20 ปี และสำหรับที่สภาวะจำกัดด้านกำลังของอาคารทั่วไป ด้วยตัวคูณน้ำหนักแรงลม 1.6 และค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคารเท่ากับ 1.0 จะได้ว่าหน่วยแรงลมในการออกแบบจะมีคาบเวลากลับประมาณ 500 ปี

สำหรับภาคใต้ตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรีลงไปเป็นพื้นที่เสี่ยงต่ออิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อนที่อาจก่อตัวขึ้นในอ่าวไทยตอนล่าง ทะเลจีนใต้ หรือมหาสมุทรแปซิฟิก พายุหมุนเขตร้อนที่ก่อตัวขึ้นนี้จะมีเส้นทางเดินพายุมุ่งไปทางทิศตะวันตกค่อนไปทางเหนือเล็กน้อยจึงมีโอกาสสูงที่เส้นทางเดินพายุจะพาดผ่านพื้นที่ภาคใต้โดยขึ้นฝั่งที่ชายฝั่งตะวันออกซึ่งเป็นพื้นที่เปิด จากข้อมูลที่ได้รับการ

บันทึกพบว่าพายุหมุนเขตร้อนที่มีความรุนแรงที่สุดที่เกิดขึ้น และทำความเสียหายอย่างใหญ่หลวงกับภาคใต้ของประเทศได้แก่พายุไต้ฝุ่นเกย์ซึ่งขึ้นฝั่งบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และจังหวัดชุมพรในปี พ.ศ. 2532 นอกจากไต้ฝุ่นเกย์แล้วยังมีพายุหมุนเขตร้อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างสูงกับบริเวณภาคใต้อีกเช่น พายุโซนร้อนแฮเรียตในปี พ.ศ. 2505 พายุโซนร้อนซาราในปี พ.ศ. 2516 และ พายุโซนร้อนรูธ ในปี พ.ศ. 2513 เป็นต้น (ปราณี ว่องวิทวัส 2532) เนื่องจากพายุไต้ฝุ่นเกย์เป็นพายุที่มีกำลังรุนแรงที่สุดที่เคยเกิดขึ้นและมีการจดบันทึกข้อมูลเส้นทางเดินพายุและความเร็วลมพายุไว้ค่อนข้างสมบูรณ์ งานวิจัยนี้จึงกำหนดใช้กำลังของพายุไต้ฝุ่นเกย์เป็นค่าอ้างอิงในการกำหนดตัวประกอบไต้ฝุ่นเพื่อควบคุมความปลอดภัยของอาคารในภาคใต้ที่สภาะจำกัดด้านกำลัง

สำหรับสภาวะจำกัดด้านการใช้งานนั้น หน่วยแรงลมในการออกแบบที่คำนวณจากความเร็วลมอ้างอิงที่กำหนดสำหรับพื้นที่ภาคใต้จะมีคาบเวลากลับประมาณ 15-20 ปี เช่นเดียวกันกับภาคอื่นๆ ส่วนที่สภาวะจำกัดด้านกำลังนั้นเมื่อพิจารณาด้านความปลอดภัยของอาคารประเภทที่มีความสำคัญสูง เช่น โรงพยาบาล สถานีดับเพลิง และ สถานที่สำคัญทางราชการให้สามารถต้านทานแรงลมพายุได้โดยไม่พังทลาย หน่วยแรงลมในการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านกำลังสำหรับอาคารประเภทนี้ จึงถูกกำหนดให้เทียบเท่ากับหน่วยแรงลมที่เกิดขึ้นจากการปะทะของพายุไต้ฝุ่นเกย์ ด้วยการกำหนดค่าความเร็วลมอ้างอิงที่สภาวะจำกัดด้านกำลังจากการคูณค่าความเร็วลมปกติที่มีคาบเวลากลับประมาณ 50 ปี (V_{50}) ด้วยตัวประกอบไต้ฝุ่น (T_F)

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ลมปกติที่ไม่รวมพายุหมุนเขตร้อน ได้แก่ข้อมูลความเร็วลมพื้นผิวสูงสุดในรอบปีจากสถานีตรวจอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 73 สถานี โดยนอกจากข้อมูลความเร็วลมแล้วยังประกอบด้วยข้อมูลความสูงของหัวตรวจวัดความเร็วลม และข้อมูลภูมิประเทศโดยรอบสถานีเพื่อใช้ในการปรับแก้ข้อมูลดิบให้สอดคล้องกับนิยามของความเร็วลมอ้างอิง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของลมปกติพบว่า ลมที่มีกำลังรุนแรงและทำความเสียหายกับบ้านเรือนทั่วไปอย่างมากเป็นลมที่เกิดในฤดูร้อนช่วงเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคมของปี (วารสารอุตุนิยมวิทยา ฉบับที่ 1/2549) ลมฤดูร้อนนี้มักประกอบด้วยฝนฟ้าคะนองรุนแรง ซึ่งเกิดจากการปะทะระหว่างมวลอากาศเย็นที่แผ่ตัวลงมาจากประเทศจีนและมวลอากาศร้อนเหนือพื้นดิน มวลอากาศเย็นจะยกมวลอากาศร้อนลอยสูงขึ้นจนและก่อตัวเป็นเมฆฝน เมื่อมวลอากาศทิ้งตัวสู่ผิวดินจะแผ่กระจายในทุกทิศทางในบริเวณไม่กว้างนัก จากการศึกษาพบว่าลมความเร็วสูงสุดของเกือบทุกปีล้วนเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อนนี้แทบทั้งสิ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของลมสำหรับประเทศไทยของ Atkinson (1971) ลมฤดูร้อนจะมีอิทธิพลมากโดยเฉพาะจังหวัดทางภาคเหนือ ภาคกลางตอนบน และ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน อิทธิพลของลมฤดูร้อนจะลดลงสำหรับภาคกลางตอนล่างและภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง โดยในบริเวณนี้จะได้รับอิทธิพลของลมมรสุม

ตะวันตกเฉียงใต้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ลมฤดูร้อนจะมีอิทธิพลน้อยมากกับภาคใต้ของประเทศ โดยในบริเวณนี้จะได้รับอิทธิพลจากทั้งลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

สำหรับข้อมูลของพายุหมุนเขตร้อนที่พัดเข้าสู่ประเทศไทย ได้จากเอกสารทางวิชาการของกรมอุตุนิยมวิทยาแห่งประเทศไทย (ปราณี ว่องวิทวัส 2532) และรายงานของหน่วยงานสากลซึ่งเฝ้าระวังและติดตามการเกิดและเส้นทางเดินของพายุ (Plante and Guard 1990) จากการศึกษาพบว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 บริเวณ คือ

1. บริเวณกลุ่มจังหวัดชายแดนทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออก

พายุหมุนเขตร้อนจะมีอิทธิพลต่อบริเวณนี้ในช่วงตั้งแต่กลางปี โดยจะมีกำลังค่อนข้างต่ำในระดับของดีเปรสชั่น เนื่องจากได้ถูกลดกำลังลงเมื่อพัดผ่านประเทศเวียดนาม ประเทศลาว และประเทศกัมพูชา ก่อนที่จะเข้าสู่ประเทศไทย จากการศึกษาพบว่าลมปกติเป็นลมที่กำหนดความเร็วลมอ้างอิงของบริเวณนี้

2. บริเวณจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศ

พายุหมุนเขตร้อนจะมีอิทธิพลต่อบริเวณนี้ในช่วงปลายปี อาจมีกำลังปานกลางในระดับพายุโซนร้อน หรืออาจมีกำลังสูงในระดับพายุไต้ฝุ่นได้เนื่องจากชายฝั่งภาคใต้เป็นแหลมล้อมรอบด้วยทะเลทั้งสองฝั่งจึงเป็นพื้นที่เปิด และ เสี่ยงต่อการเข้าปะทะของพายุโดยตรง เพื่อป้องกันความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างมหาศาลดังเช่นที่เคยเกิดขึ้นจากพายุไต้ฝุ่นเกย์ในอดีต ความเร็วอ้างอิงของบริเวณจังหวัดทางภาคใต้นี้ จะถูกกำหนดจากอิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อน ถึงแม้ว่าผลการศึกษาของ Mikitiuk และ คณะ (1995) จะบ่งชี้ว่าพายุหมุนเขตร้อนจะมีอิทธิพลมากกว่าลมปกติเมื่อคาบเวลากลับมากกว่า 1000 ปีก็ตาม

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเร็วลมอ้างอิงแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนการปรับแก้ค่าข้อมูลความเร็วลมที่ได้จากการตรวจวัด โดยประมาณว่าข้อมูลดิบของความเร็วลมเป็นค่าเฉลี่ยใน 5 วินาที เนื่องจากเวลาหน่วงของเครื่องมือตรวจวัด เป็นความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง ที่ระดับ 10 เมตร ในสภาพเปิดโล่ง (Simui และ Scanlan 1986)
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเร็วลมที่ปรับแก้แล้วด้วยทฤษฎีค่าปลายสุดแบบที่ 1 เพื่อประมาณค่ากำหนดการกระจายตัว (dispersion parameter, α) และ ค่ากำหนดตำแหน่ง (location parameter, β) ของฟังก์ชั่นการกระจายตัวสะสมของความเร็วลม ด้วยวิธี

Probability Weighted Moment (Palutikof และ คณะ 1999) จากการวิเคราะห์พบว่าฟังก์ชั่นการกระจายตัวสะสมของความเร็วลมเนื่องจากอิทธิพลของลมปกติจะมีค่า α อยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 4.0 ค่ากำหนดการกระจายตัวนี้สื่อถึงค่าเบี่ยงเบนของความเร็วลมสูงสุดในแต่ละปี จะเห็นได้ว่าลมปกติที่เกิดขึ้นในภาคใต้มีค่า α ค่อนข้างน้อย ซึ่งสอดคล้องกับความจริงที่ว่าลมปกติที่มีอิทธิพลต่อภาคใต้คือลมมรสุมประจำปีซึ่งเป็นลมที่มีพฤติกรรมค่อนข้างแน่นอนและสม่ำเสมอ ส่วนทางตอนบนของประเทศจะได้รับอิทธิพลของพายุฤดูร้อนซึ่งมีพฤติกรรมไม่แน่นอนและเกิดขึ้นในบริเวณแคบ ผลการวิเคราะห์จึงได้ค่า α ที่สูงกว่า

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความเร็วลมที่มีคาบเวลากลับ 50 ปี เพื่อกำหนดความเร็วลมอ้างอิงที่มีคาบเวลากลับประมาณ 50 ปี เมื่อพิจารณาเส้นชั้นของค่ากำหนดการกระจายตัว ร่วมกับผลการวิเคราะห์ความเร็วลม ณ สถานีต่างๆที่คาบเวลากลับ 50 ปี จึงสามารถประมาณเส้นชั้นของความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 50 ปีเนื่องจากอิทธิพลของลมปกติได้ดังรูปที่ อ.2.2 จากการศึกษาพบว่าภาคเหนือตอนบนมีค่า V_{50} ประมาณ 29 เมตรต่อวินาที ภาคเหนือตอนล่างมีค่า V_{50} ประมาณ 27 เมตรต่อวินาที จังหวัดทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือบริเวณชายแดนจะมีค่า V_{50} ประมาณ 27 เมตรต่อวินาที ส่วนตอนกลางของประเทศและภาคใต้จะมีค่า V_{50} ประมาณ 25 เมตรต่อวินาที

4. ขั้นตอนการตัวคูณน้ำหนักของแรงลม พิจารณาจากการกำหนดให้หน่วยแรงลมสำหรับสภาวะจำกัดด้านกำลังมีคาบเวลากลับที่ประมาณ 500 ปี จากการแบ่งกลุ่มจังหวัดออกเป็น 4 บริเวณตามแนวโน้มของเส้นชั้นค่ากำหนดการกระจายตัวในรูปที่ อ.2.2 ได้ค่าเฉลี่ยของค่ากำหนดการกระจายตัวของกลุ่ม ($\hat{\alpha}$) และ ค่าเฉลี่ยบวกหนึ่งเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 30 ปี ($\hat{V}_{30} = \overline{V}_{30} + \sigma$) สามารถคำนวณหาค่ากำหนดตำแหน่ง ($\hat{\beta}$) ค่าความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 50 ปี ($\hat{V}_{50}$) และ 500 ปี ($\hat{V}_{500}$) และ ตัวคูณน้ำหนักของแรงลมที่เหมาะสม (F_W) ของแต่ละกลุ่ม ดังนี้

$$\hat{\beta} = \hat{V}_{30} + \hat{\alpha} \cdot \ln [- \ln (1 - \frac{1}{30})]$$

$$\hat{V}_{50} = \hat{\beta} - \hat{\alpha} \cdot \ln [- \ln (1 - \frac{1}{50})]$$

$$\hat{V}_{500} = \hat{\beta} - \hat{\alpha} \cdot \ln [- \ln (1 - \frac{1}{500})]$$

$$F_W \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot (\hat{V}_{50})^2 = 0.5 \cdot \rho \cdot (\hat{V}_{500})^2$$

$$F_W = \left(\frac{\hat{V}_{500}}{\hat{V}_{50}} \right)^2$$

	$\hat{\alpha}$	$\hat{V}_{30}$	$\hat{\beta}$	$\hat{V}_{50}$	$\hat{V}_{500}$	F_W
กลุ่มภาคเหนือ	3.4	26.8	15.3	28.6	36.4	1.62
กลุ่มตะวันออกเฉียงเหนือ	3.2	25.3	14.6	26.9	34.2	1.61
กลุ่มพื้นที่ตอนกลาง	2.8	23.5	14.0	24.9	31.4	1.60
กลุ่มภาคใต้	2.5	22.6	14.2	23.9	29.6	1.53

จากการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่า ตัวคูณน้ำหนักของแรงลมเนื่องจากอิทธิพลของลมปกติที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1.6

5. ขั้นตอนการวิเคราะห์หาตัวประกอบไต้ฝุ่นของพื้นที่ภาคใต้ จากรายงานและการวิเคราะห์ของ Joint Typhoon Warning Center (Plante and Guard 1990) พบว่าพายุไต้ฝุ่นเกย์มีความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ยใน 1 นาที ที่ระดับ 10 เมตร เมื่อขึ้นฝั่งที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์และจังหวัดชุมพรประมาณ 100 น็อต (หรือ 51.4 เมตรต่อวินาที) และลดกำลังลงเหลือประมาณ 80 ถึง 90 น็อตหลังจากพัดผ่านผืนดินก่อนเข้าสู่ทะเลอันดามัน จากนั้นจึงทวีความรุนแรงมากขึ้นเป็นระดับซุปเปอร์ไต้ฝุ่นและขึ้นฝั่งที่ประเทศอินเดียอีกครั้ง ความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 นาทีที่ระดับ 51.4 เมตรต่อวินาที สามารถแปลงเป็นความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมงได้โดย 51.4/1.25 = 41.1 เมตรต่อวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความเร็ว 37.5 เมตรต่อวินาที ที่ได้จากการศึกษาเพื่อจำลองพฤติกรรมของพายุไต้ฝุ่นเกย์โดย Mikituik และคณะ (1995) จากการพิจารณาด้านความปลอดภัยของอาคารประเภทที่มีความสำคัญสูงในการต้านทานแรงลมพายุได้โดยไม่พังทลาย หน่วยแรงลมที่เกิดจากพายุไต้ฝุ่นเกย์ $\frac{1}{2}\rho\cdot(41.1)^2$ จึงถูกใช้เป็นตัวกำหนดสภาวะจำกัดด้านกำลังสำหรับอาคารที่มีความสำคัญสูง และสูงมาก

$$1.15\cdot 1.6\cdot\frac{1}{2}\rho\cdot(T_F\cdot 25)^2=\frac{1}{2}\rho\cdot(41.1)^2$$

$$T_F=1.21$$

จึงได้ค่าตัวประกอบไต้ฝุ่นสำหรับบริเวณชายฝั่งตะวันออกของภาคใต้ประมาณ 1.2 เมื่อพายุขึ้นฝั่งแล้วจะอ่อนกำลังลงเนื่องจากความชื้นของอากาศที่ลดลงและการพัดผ่านสิ่งกีดขวางบนพื้นดิน อย่างไรก็ตามเนื่องจากภาคใต้ของไทยเป็นพื้นที่แคบและมีทะเลขนาบทั้งสองด้าน กำลังของพายุจึงมิได้ลดลงมากเหมือนกรณีพายุที่พัดเข้าประเทศทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากข้อมูลพบว่าพายุไต้ฝุ่นเกย์มีความเร็ว 100 น็อตเมื่อขึ้นฝั่งและลดกำลังลงเป็นประมาณ 80 ถึง 90 น็อตเมื่อเข้าสู่ประเทศพม่า จากสาเหตุดังกล่าว

จึงกำหนดใช้ค่าประกอบไต้ฝุ่น 1.2 เฉพาะในแถบบริเวณประมาณ 50 กิโลเมตรจากชายฝั่งตะวันออก และพิจารณาปรับลดความเร็วลมของพายุเมื่อเข้าสู่ผืนดินลงเหลือร้อยละ 90 จึงได้ค่าตัวประกอบไต้ฝุ่นสำหรับจังหวัดเพชรบุรีและบริเวณชายฝั่งตะวันตกเท่ากับ 1.08

6. ขั้นตอนกำหนดค่าความเร็วลมอ้างอิง จากเส้นชั้นของ V_{50} ในรูปที่ อ.2.2 และการแบ่งการกำหนดค่า T_F ของภาคใต้แยกเป็น 2 บริเวณ จึงสามารถจำแนกความเร็วลมอ้างอิงที่เหมาะสมของแต่ละพื้นที่เป็นกลุ่มดังนี้

	V_{50}	T_F
ภาคเหนือตอนบน	29 เมตรต่อวินาที	1.0
ภาคเหนือตอนล่าง	27 เมตรต่อวินาที	1.0
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือบริเวณชายแดน	27 เมตรต่อวินาที	1.0
ตอนกลางของประเทศ	25 เมตรต่อวินาที	1.0
ภาคใต้ฝั่งตะวันตก และจังหวัดเพชรบุรี	25 เมตรต่อวินาที	1.08
ภาคใต้ฝั่งตะวันออก	25 เมตรต่อวินาที	1.2

ความเร็วลมอ้างอิงของแต่ละกลุ่มคำนวณได้จาก

สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน $\overline{V} = V_{50}$

สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านกำลัง $\overline{V} = T_F \cdot V_{50}$

รายละเอียดเพิ่มเติมปรากฏใน วิโรจน์ บุญญภิญโญ และคณะ (2550 ก) และ นเรศ ลิมสัมพันธ์เจริญ และคณะ (2550)

คณะผู้วิจัยได้เสนอค่าประกอบไต้ฝุ่นดังกล่าวสำหรับภาคใต้และจังหวัดเพชรบุรี สำหรับอาคารทุกประเภท (ตารางที่ 2-1) อย่างไรก็ตามคณะกรรมการกำกับดูแลการปฏิบัติงานของที่ปรึกษาได้พิจารณาเห็นว่าบริเวณจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศไทยมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดพายุไต้ฝุ่นและมีความรุนแรงเทียบเท่าพายุเกย์น้อยมาก ดังนั้นคณะกรรมการฯจึงได้กำหนดให้ใช้ค่าประกอบไต้ฝุ่นดังกล่าวกับอาคารประเภทความสำคัญสูงมากเท่านั้น (ตารางที่ 2-1) ส่วนอาคารประเภทอื่นการใช้ค่าประกอบดังกล่าวให้เป็นไปตามดุลยพินิจของผู้คำนวณออกแบบโครงสร้าง

ข. ความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาต่างๆ

ความเร็วลมอ้างอิงในมาตรฐานนี้ คือความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่ง สำหรับคาบเวลากลับ 50 ปี ความเร็วลมเฉลี่ยขึ้นกับช่วงความยาวของเวลาที่ใช้เฉลี่ย เมื่อช่วงเวลาที่ใช้เฉลี่ยลดลง ความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดจะเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลา t วินาที กับช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดินในสภาพภูมิประเทศโล่ง หาได้จากรูปที่ อ.2.3 (Durst 1990) ความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ถูกยืนยันความถูกต้องโดยนักวิจัยจำนวนมาก และถูกนำไปใช้ในมาตรฐานสากลต่างๆ

ดังนั้น ในกรณีที่ใช้มาตรฐานอื่นซึ่งความเร็วลมอ้างอิงอาจไม่ได้คำนวณจากความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง จะต้องแปลงความเร็วลมอ้างอิงในมาตรฐานนี้ไปเป็นความเร็วลมอ้างอิงเทียบเท่าในช่วงเวลา t วินาที ตัวอย่างเช่น มาตรฐาน ASCE7-05 (ASCE 2005) นิยามความเร็วลมอ้างอิงคือความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 3 วินาที จากรูปที่ อ.2.3 ได้ $V_3 / V_{3600} = 1.52$ ดังนั้น เมื่อความเร็วลมอ้างอิงในมาตรฐานนี้เท่ากับ 25 ม./วินาที จะเทียบเท่าความเร็วลมอ้างอิงในมาตรฐาน ASCE7-05 เท่ากับ $25 \times 1.52 = 38$ ม./วินาที เป็นต้น

ค. ความเร็วลมเฉลี่ยสำหรับคาบเวลากลับต่างๆ

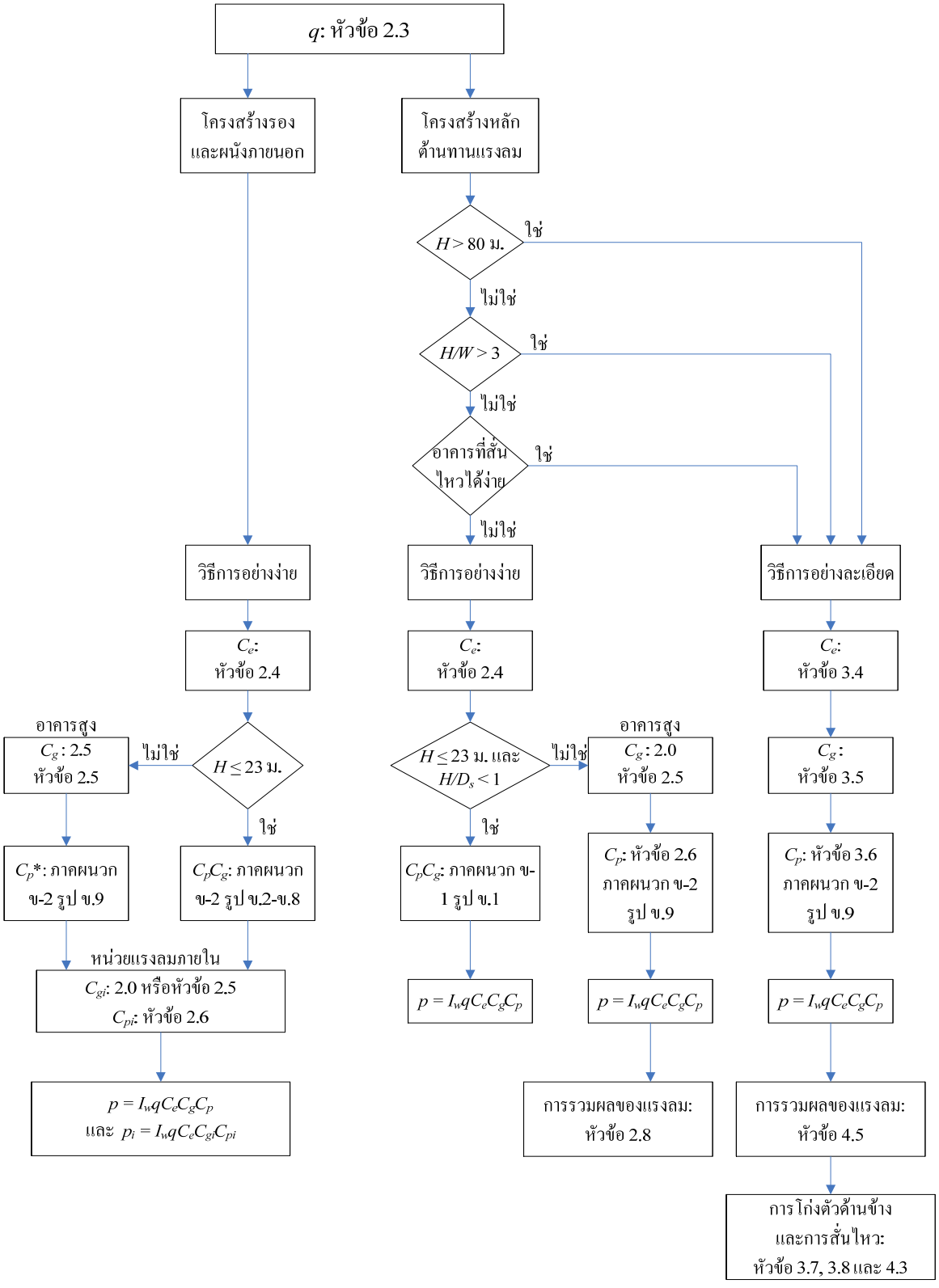
เมื่อพิจารณาเฉพาะความเร็วลมเนื่องจากลมปกติเพียงอย่างเดียวโดยไม่รวมอิทธิพลของไต้ฝุ่น ค่าความเร็วลมเฉลี่ยสำหรับคาบเวลากลับ N ปี (V_N) ของกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงใดๆ สามารถคำนวณได้จากค่าความเร็วลมเฉลี่ยสำหรับคาบเวลากลับ 50 ปี (V_{50}) ของกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงดังกล่าวได้โดยสมการ

$$V_N = FV_{50}$$

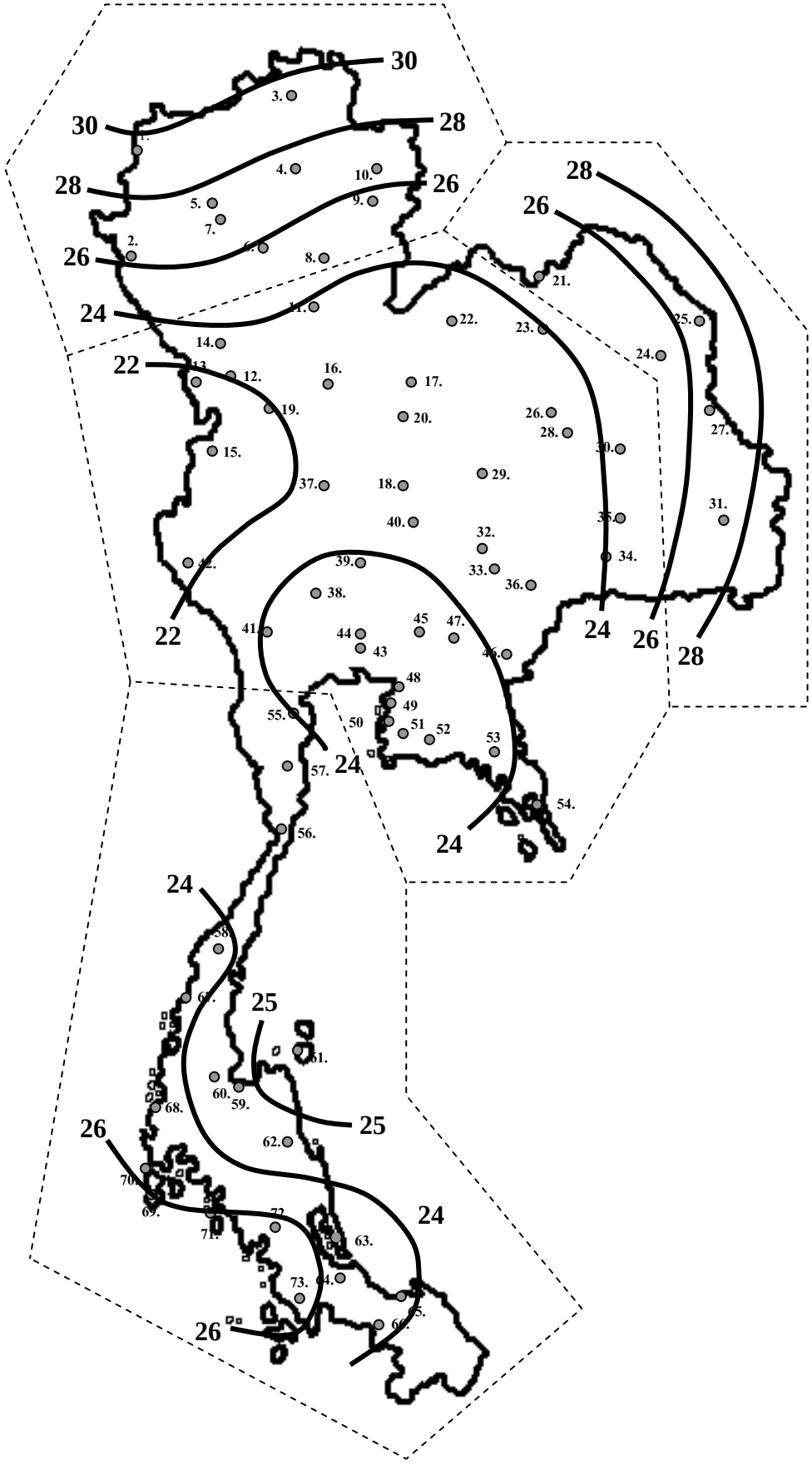
โดยที่ F = ค่าประกอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเฉลี่ยสำหรับคาบเวลากลับต่างๆ แสดงในตารางที่ อ.2-1

2.4 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

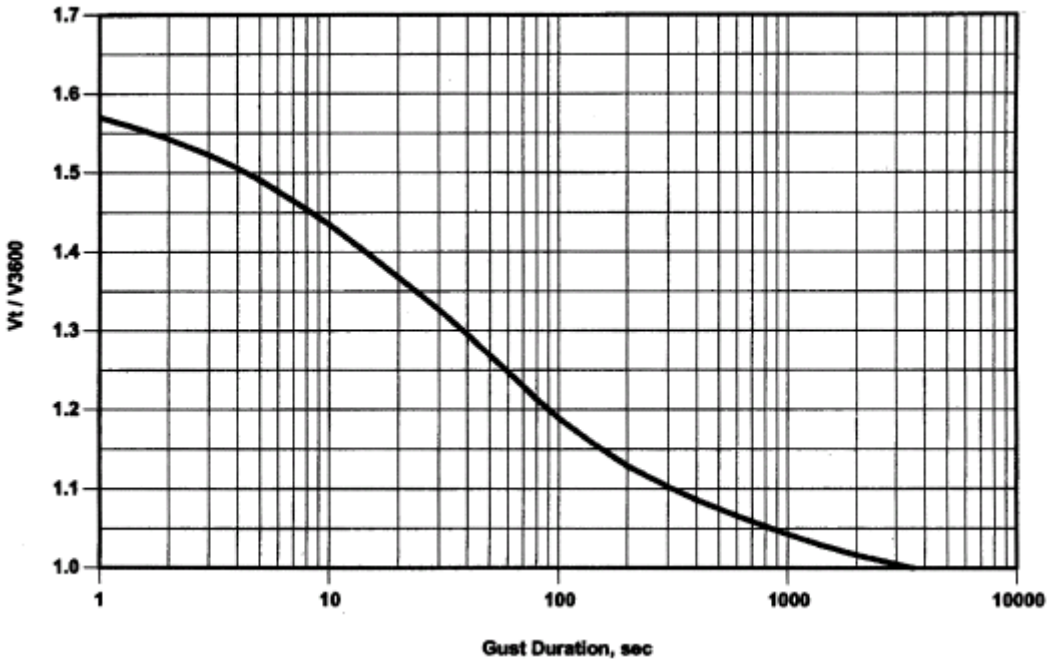
ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ เป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมให้แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ ตัวอย่างสภาพภูมิประเทศแบบ A และ B โดยวิธีการอย่างง่าย และวิธีการอย่างละเอียด แสดงในรูปที่ อ.2.4 และ อ.2.5 ตามลำดับ และตัวอย่างสภาพภูมิประเทศแบบ C โดยวิธีการอย่างละเอียด แสดงในรูปที่ อ.2.6 และ อ.2.7



รูปที่ อ.2.1แผนภาพขั้นตอนการคำนวณแรงลมและการตอบสนองโดยวิธีการอย่างง่ายและวิธีการอย่างละเอียด



รูปที่ อ.2.2 เส้นชั้นความเร็วลมเนื่องจากอิทธิพลของลมปกติ ที่คาบเวลากลับ 50 ปี (เมตรต่อวินาที)



รูปที่ อ.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา t วินาที กับช่วงเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ อ.2-1 ค่าประกอบการแปลงความเร็วลมเฉลี่ยสำหรับคาบเวลากลับต่างๆ

N (ปี)	F
5	0.73
10	0.81
15	0.86
20	0.90
25	0.92
30	0.94
35	0.96
40	0.98
45	0.99
50	1.00
100	1.08
200	1.16
500	1.26
1,000	1.34

รูปที่ อ.2.4 ตัวอย่างสภาพภูมิประเทศแบบ A ซึ่งเป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่งซึ่งมีอาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้าง กระจัดกระจายอยู่ห่างๆ กัน หรือเป็นบริเวณชายฝั่งทะเล

รูปที่ อ.2.5 ตัวอย่างสภาพภูมิประเทศแบบ B ซึ่งเป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือพื้นที่ที่มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดเล็ก

รูปที่ อ.2.6 ตัวอย่างสภาพภูมิประเทศแบบ C ซึ่งเป็นสภาพภูมิประเทศของบริเวณศูนย์กลางเมืองใหญ่ มีอาคารสูงอยู่หนาแน่น โดยที่อาคารไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ต้องมีความสูงเกิน 4 ชั้น

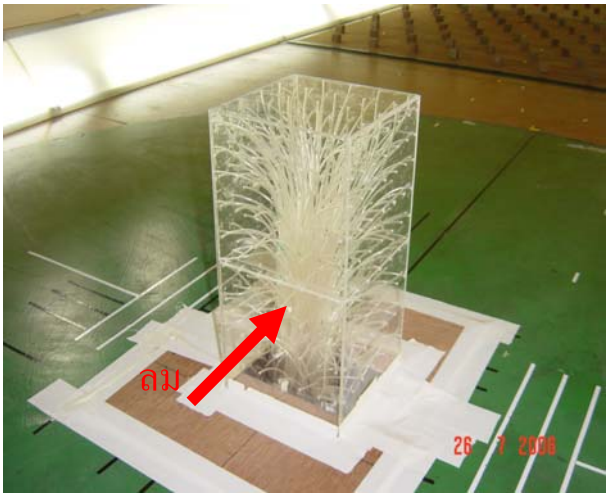
รูปที่ อ.2.7 ภาพด้านหลังเป็นตัวอย่างสภาพภูมิประเทศแบบ C ภาพด้านหน้าเป็นตัวอย่างสภาพภูมิประเทศแบบ B

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศในสมการ (2-5) และสมการ (2-6) นั้นกำหนดขึ้นให้สอดคล้องกับลักษณะของลมโดยทั่วไปซึ่งพัดผ่านพื้นที่บริเวณกว้างเช่นลมมรสุมประจำปีและลมที่เกิดจากพายุหมุนเขตร้อน กล่าวคือความเร็วลมเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามความสูง แต่การแปรเปลี่ยนของความเร็วลมเฉลี่ยตามระดับความสูงของลมที่เกิดจากพายุฝนฟ้าคะนองนั้นแตกต่างไป โดยความเร็วลมสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระดับต่ำเหนือพื้นดิน ลมจะมีความเร็วค่อนข้างคงที่จากระดับ 40 เมตรถึง 60 เมตร และจะมีความเร็วน้อยลงที่ระดับสูงขึ้นไป อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่าเมื่อใช้ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่กำหนดให้ควบคู่กับค่าความเร็วลมอ้างอิงในแต่ละกลุ่มพื้นที่นั้น หน่วยแรงลมที่คำนวณได้จะให้ค่าที่ครอบคลุมหน่วยแรงลมที่เกิดจากพายุฝนฟ้าคะนองในเกือบทุกกรณี ยกเว้นในบริเวณที่มีความเร็วลมอ้างอิงไม่เกิน 25 เมตรต่อวินาที ในรูปที่ ก.1 ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ค่อนข้างน้อยและเมื่อใช้ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศแบบ B พบว่าในบางกรณี ค่าความเร็วลมที่ระดับต่ำที่คำนวณได้นั้นจะมีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วลมที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากพายุฝนฟ้าคะนองพอสมควร ด้วยเหตุนี้จึงพิจารณาไม่อนุญาตให้ใช้ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศแบบ B กับอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร และตั้งอยู่ในกลุ่มที่มีความเร็วลมอ้างอิงไม่เกิน 25 เมตรต่อวินาที

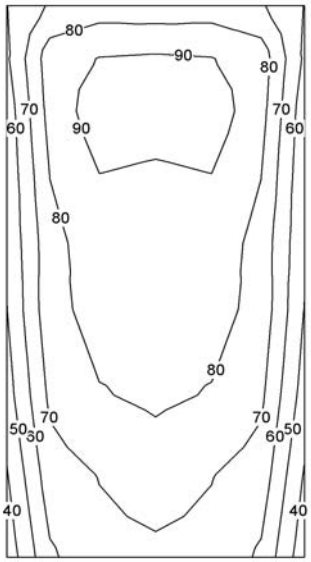
2.6 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม

ก. ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของอาคาร

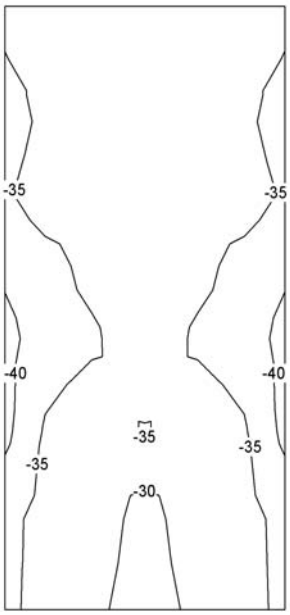
ในประเทศไทย ได้มีการทดสอบแบบจำลองแข็งของอาคารในอุโมงค์ลม เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม (วิโรจน์ บุญญภิญโญ และคณะ 2550 ข) งานวิจัยดังกล่าวได้ทำการทดสอบอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม 4 อาคาร ที่มีอัตราส่วนความกว้าง ความลึก และความสูง ซึ่งเป็นตัวแทนของอาคารเตี้ย 45:45:45 ม. (1:1:1) อาคารสูงปานกลาง 45:45:90 ม. (1:1:2) อาคารสูง 30:45:180 ม.(1:1.5: 6) และ 45:30:180 (1:2/3:4) ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ยด้านต้นลมของอาคารสูงปานกลาง และสูง โดยทั่วไปเท่ากับ 0.8 ซึ่งตรงกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน ASCE 7-05 (ASCE 2005) ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ NBCC (NBCC 2005) ของประเทศแคนาดา นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมด้านท้ายลมของอาคารเทียบกับความเร็วลมอ้างอิงที่ยอดอาคาร ดังกล่าวโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง -0.24 ถึง -0.5 ขึ้นกับอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของอาคาร ซึ่งค่าโดยทั่วไปสอดคล้องกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานทั้งสองดังกล่าว



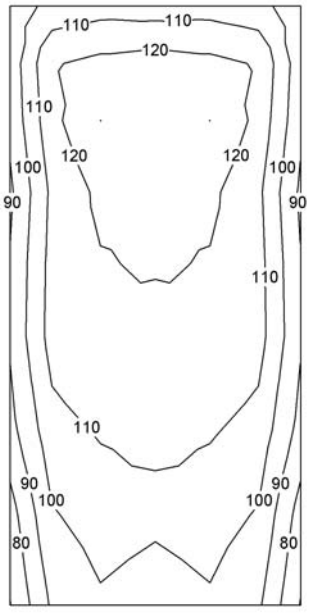
ก.) แบบจำลองแข็ง



ข.) แรงลมด้านต้นลม



ค.) แรงลมด้านท้ายลม



ง.) รวมแรงลมด้านต้นลมและท้ายลม

รูปที่ อ.2.8 หน่วยแรงลมของอาคารสูงปานกลางขนาด 45 ×45 เมตร และสูง 90 เมตร ที่คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมจากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมร่วมกับการคำนวณทางสถิติ สำหรับความเร็วลมอ้างอิงเท่ากับ 25 เมตร/วินาที ในสภาพภูมิประเทศแบบ B (กก./ม.^{2})

ตัวอย่างหน่วยแรงลมของอาคารสูงปานกลางขนาด 45 ×45 เมตร และสูง 90 เมตร ที่คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมจากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมร่วมกับการคำนวณทางสถิติ แสดงในรูปที่ อ.2.8 สำหรับความเร็วลมอ้างอิงเท่ากับ 25 เมตร/วินาที ในสภาพภูมิประเทศแบบ B (กก./ม.^{2}) (วิโรจน์ บุญญภิญโญ และคณะ 2550 ข, ค)

ข. ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของป้าย

แรงลมสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้ายและกำแพงในมาตรฐานต่างประเทศ เช่น ASCE 7-05 (ASCE 2005) และ AS/NZS1170.2:2002 (AS 2002) ได้ถูกกำหนดขึ้นตามหลักวิชาอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) โดยที่ค่าสัมประ สิทธิ์สำคัญๆ เช่น Drag Coefficient นั้น ได้มาจากการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของป้ายและกำแพงในอุโมงค์ลม อย่างไรก็ดี มาตรฐานรุ่นก่อนๆเช่น ASCE7-02 (ASCE 2002) มักอ้างอิงงานของ Flachbart ในปี ค.ศ. 1930 (Simiu and Scanlan 1996) ซึ่งเป็นการทดสอบอุโมงค์ลมที่ล้าสมัยเพราะไม่ได้จำลองสภาพลมธรรมชาติให้เหมือนจริง ในขณะที่มาตรฐานฉบับปัจจุบัน เช่น ASCE7-05 และ AS/NZS1170.2: 2002 อ้างอิงงานของ Letchford ในช่วงปีค.ศ.1994-2001 (Letchford 2001, Letchford and Holmes 1994) ซึ่งเป็นการทดสอบอุโมงค์ลมที่ทันสมัย โดยมีการทำแบบจำลองป้ายและกำแพงและสภาพลมธรรมชาติได้สมจริง ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์เพื่อใช้คำนวณแรงลมที่เหมาะสมและน่าเชื่อถือกว่า

ในประเทศไทย ได้มีการทดสอบแบบจำลองป้ายในอุโมงค์ลม ซึ่งเป็นงานวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ร่วมกับ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (Sinthuwong 2004, Poemsantitham 2005, สุวรรสาม ศรีวิเชียร 2546, ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล 2548, Warnitchai and Sinthuwong 2006) ในงานวิจัยนี้ ได้มีการทดสอบแบบจำลองป้ายรูปร่างลักษณะต่างๆ ภายใต้แรงลมที่มีทิศทางเข้าประทะในแบบต่างๆ รวมทั้งมีการศึกษาถึงผลกระทบของอาคารและสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงที่มีต่อแรงลมที่กระทำต่อป้าย ผลการวิจัยหลักสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Letchford (Letchford 2001, Letchford and Holmes 1994) อีกทั้งยังให้ข้อมูลในรายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะของแรงลมในแง่มุมต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำข้อกำหนดแรงลมสำหรับการออกแบบป้าย

ผลการทดสอบแบบจำลองป้าย (และกำแพง) ในอุโมงค์ลม แสดงอย่างชัดเจนว่า:

(1) แรงลมที่กระทำต่อป้ายเกิดจาก แรงดันลม (Pressure) ที่กระทำตั้งฉากกับแผ่นป้าย ส่วนแรงเฉือน (Shear Force) ที่กระทำในระนาบของแผ่นป้ายมีค่าต่ำมากจนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา

ดังนั้น แรงลัพท์ที่เกิดจากลมจึงมีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นป้ายเสมอไม่ว่าทิศทางของลมจะทำมุมเอียงกับแผ่นป้ายเท่าใดก็ตาม

(2) แรงลัพธ์ที่ตั้งฉากกับแผ่นป้าย เรียกในที่นี้ว่า Drag Force มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามทิศทางของลม โดยมีค่าสูงสุดเมื่อมุมระหว่างทิศทางของลมกับเส้นที่ตั้งฉากกับระนาบป้าย (มุม θ ในรูป ข.11(ก)) มีค่าอยู่ระหว่าง -45º กับ +45º (θ = 0º คือ กรณีที่ลมมีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นป้าย) และ Drag Force มีค่าลดต่ำลง เมื่อ θ มีค่ามากกว่า +45º หรือ ต่ำกว่า -45º

(3) แรงดันลม (Pressure) ณ ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นป้าย มีค่าแปรเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลา จึงส่งผลให้ค่า Drag Force เปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลา นอกจากนี้การกระจายตัวของแรงดันลมบนแผ่นป้ายก็มีการแปร เปลี่ยนรูปร่างตลอดเวลาเช่นกัน และมักจะเป็นการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Pressure Distribution) จึงทำให้ Drag Force มิได้กระทำต่อศูนย์กลางของแผ่นป้าย แต่จะเยื้องศูนย์ออกไปจนทำให้เกิดแรงบิด (Torsion) กระทำต่อแผ่นป้าย

(4) แรงบิด (Torsion) สูงสุด เกิดขึ้นเมื่อ θ มีค่าประมาณ +45º หรือ -45º โดยค่าเยื้องศูนย์ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดนี้ มีค่าไม่เกิน 20% ของความกว้างของแผ่นป้าย ($e \leq 0.2b$) ในขณะที่ แรงบิดมีค่าต่ำสุดและมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์เมื่อ θ = 0º อย่างไรก็ดี ค่า Drag Force สูงสุดที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 กรณี มีค่าใกล้เคียงกัน

ด้วยลักษณะของแรงลมที่กระทำต่อป้าย(และกำแพง) ดังกล่าว มาตรฐานฉบับนี้จึงกำหนดให้พิจารณาทั้งกรณี θ = 0º ที่มีแรงลมสำหรับออกแบบกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความกว้างของแผ่นป้ายและมีแรงบิดเป็นศูนย์ (ข.11(3)) และ กรณี $\theta = \pm 45^{\circ}$ ที่มีแรงลมกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดแรงบิดสูงสุด (ข.11(4)) โครงสร้างของป้าย(และกำแพง) จำเป็นต้องถูกออกแบบให้สามารถต้านทานสภาพแรงลมที่แตกต่างกันนี้ ได้ทั้ง 2 กรณี จึงจะปลอดภัย

เนื่องจากค่า Drag Force สูงสุดที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 กรณีดังกล่าวข้างต้น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ย C_{pa} ตัวเดียวกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ ข.2 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยพิจารณาจากค่า Drag Coefficient ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของป้าย (และกำแพง) ในอุโมงค์ลม ในงานวิจัยของ Letchford (Letchford 2001, Letchford and Holmes 1994) และงานวิจัยในประเทศไทย (Sinthuwong 2004, Poemsantitham 2005, สุวรรณสาม ศรีวิเชียร 2546, ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล 2548, Warnitchai and Sinthuwong 2006)

มาตรฐานได้กำหนดให้ใช้ค่าประกอบ C_g เท่ากับ 2.35 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในกรณีที่โครงสร้างมีการตอบสนองต่อแรงลมแบบกึ่งสถิต (Quasi-Static) ทั้งนี้เนื่องจากป้ายและกำแพงโดยทั่วไปมีความสูงไม่เกิน 30 เมตรและมีความถี่ธรรมชาติสูงกว่า 1 Hz

คำอธิบาย บทที่ 3

การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า และการตอบสนองในทิศทางลม โดยวิธีการอย่างละเอียด

3.5 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม

ก. หลักการพื้นฐาน ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม

แรงที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างเนื่องจากลมมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาแบบสุ่ม (random) ทั้งในด้านของขนาดของแรงและส่วนผสมของความถี่ที่มีค่าในช่วงกว้าง ผลของแรงในลักษณะนี้จึงทำให้โครงสร้างมีการตอบสนองหลักด้วยความถี่ธรรมชาติของตัวโครงสร้าง ซึ่งอาจมีหลายรูปแบบการสั่นไหว โดยทั่วไปแล้ว พลังงานส่วนใหญ่ของความถี่ที่ประกอบกันในแรงลมอยู่ในค่าความถี่ที่ต่ำเมื่อเทียบกับความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของโครงสร้าง ดังนั้นการวิเคราะห์จึงสามารถใช้เพียงผลจากรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานเพื่อให้ได้คำตอบที่มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้

แรงลมที่เกิดขึ้นในทิศทางลมประกอบด้วย (1) ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดจากค่าเฉลี่ยของความเร็วลม (2) ส่วนกึ่งสถิต (quasi-static) ที่เกิดจากความผันผวนของลมที่ความถี่ต่ำ และ (3) ส่วนกำทอน (resonant) ที่เกิดจากความผันผวนของลมที่ความถี่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติ

วิธีการคำนวณแรงและผลตอบสนองในทิศทางลมที่กำหนดไว้ในบทที่ 2 และ 3 ของมาตรฐานฉบับนี้ใช้สำหรับการประมาณผลของแรงสถิตเทียบเท่าที่เกิดจากลมที่ทำให้เกิดผลตอบสนองสูงสุดด้วยหลักค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (gust effect factor) (Davenport 1967) โดยแรงสถิตเทียบเท่าที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมจาก ค่าเฉลี่ย ค่าจากส่วนกึ่งสถิต และค่าจากส่วนกำทอนซึ่งเกิดจากผลการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ในทิศทางลมจากความปั่นป่วน (turbulence) ในชั้นบรรยากาศของลมที่ปะทะโครงสร้าง

หลักค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลมคือ การประมาณค่าสูงสุดของผลตอบสนองของโครงสร้างจากค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองคูณด้วยค่าประกอบที่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเร็วลม ระยะเวลาที่พิจารณาค่าเฉลี่ย ลักษณะสภาพภูมิประเทศ ขนาดของโครงสร้าง และคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง เป็นต้น

ผลการคูณขยายเชิงพลศาสตร์สำหรับแรงและผลตอบสนองจากวิธีค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม สามารถหาได้จากหลักการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (random vibration)

ตัวอย่างเช่น การพิจารณาหาค่าผลตอบสนองสูงสุด $(y_{\max})$ สามารถประมาณได้จากค่าเฉลี่ย (μ) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (root-mean-square, RMS) (σ) โดยทฤษฎีความน่าจะเป็น ค่าผลตอบสนองสูงสุดสำหรับช่วงเวลาที่พิจารณา (T) สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$y_{\max} = \mu + g_p \sigma \qquad \text{(อ.3-1)}$$

g_p คือค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด มีความสัมพันธ์ตามจำนวนครั้งที่ผลจากแรงลมมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่พิจารณา (หรือหมายความถึง ความผันผวน (fluctuation) โดยเฉลี่ยของข้อมูล) โดยที่ใช้ค่า $T = 3600$ วินาที สำหรับการใช้ความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาที่พิจารณา 1 ชั่วโมงเป็นความเร็วลมอ้างอิง ค่า g_p มีค่าอยู่ในช่วง 3.5 ถึง 4.0 และกำหนดไว้ในสมการที่ (3-9) ซึ่งมีสมมุติฐานว่าความน่าจะเป็นของการเกิดค่าเฉลี่ยของผลของแรงลมมีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Gaussian (Davenport 1964)

ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (C_g) มีนิยามคือ อัตราส่วนของค่าผลตอบสนองสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นต่อค่าเฉลี่ยของผลตอบสนอง ดังนี้

$$C_g = \frac{y_{\max}}{\mu} = 1 + g_p \frac{\sigma}{\mu} \qquad \text{(อ.3-2)}$$

โดยที่ผลตอบสนองแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ power spectrum density ของผลตอบสนอง (y) ที่สามารถจำแนกเป็นส่วนกึ่งสถิตและส่วนกำทอน โดยที่การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวได้มาจากการลดรูปการคำนวณเพื่อให้สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ โดยมีองค์ประกอบดังนี้ (สมการที่ (3-5))

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}}\left(B + \frac{sF}{\beta}\right)} \qquad \text{(อ.3-3)}$$

โดยคำอธิบายเพิ่มเติมสำหรับค่า σ/μ มีดังนี้

- ผลตอบสนองของอาคารสูงที่มีความอ่อนตัวต่อแรงพลวัติที่มีลักษณะสุ่มและมีความผันผวนซึ่งเป็นปัญหาเช่นแรงลมนี้ สามารถประมาณค่าผลตอบสนองของอาคารจากการพิจารณาแบบจำลองที่มีค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร (เช่น ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานและอัตราส่วนความหน่วง ซึ่งอธิบายไว้ในส่วนต่อไป) ที่เหมาะสมสำหรับอาคาร

นั้น ค่าความแปรปรวน (variance) ของผลตอบสนองหาค่าได้จากพื้นที่ใต้กราฟของผลคูณของสเปกตรัมของแรงลมกับกำลังสองของตัวคูณขยายทางพลวัติ (dynamic magnification factor) สำหรับแบบจำลองอาคารนั้น

- คุณลักษณะด้านความปั่นป่วนของความเร็วลมที่มีลักษณะสุ่มสามารถอธิบายได้ในรูปของสเปกตรัมความเร็วลมที่แสดงถึงสัดส่วนพลังงานที่มีอยู่ขององค์ประกอบที่มีความถี่ต่างๆ ผสมอยู่ในความเร็วลม และการแปลงสเปกตรัมความเร็วลมให้เป็นสเปกตรัมของแรงลมที่กระทำต่ออาคารสามารถทำได้ซึ่งต้องรวมผลการคำนึงถึงผลรวมของแรงเนื่องจากความปั่นป่วนของลมที่มีผลเนื่องจากขนาดของอาคารด้วยฟังก์ชั่น aerodynamic admittance ที่มีค่าประมาณ 1.0 สำหรับอาคารขนาดเล็กหรือมีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำ และมีค่าลดลงเมื่อขนาดหรือความถี่ธรรมชาติของอาคารเพิ่มขึ้น
- ในการคำนวณผลตอบสนองของอาคารเนื่องจากลมในรูปของอัตราส่วนของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยต่อค่าเฉลี่ย σ/μ ความเร็วลมส่วนที่ปั่นป่วนถูกพิจารณาในรูปของสมการสำหรับสเปกตรัมความเร็วลมที่สร้างขึ้นจากการศึกษาพฤติกรรมของลมในธรรมชาติ และการพิจารณา aerodynamic admittance function ก็เป็นการสร้างสมการที่ปรับให้อยู่ในรูปแบบที่ใช้งานสะดวกจากข้อมูลการศึกษาและทดสอบด้วยอุโมงค์ลม โดยทั่วไปรูปร่างของสเปกตรัมของความเร็วลมมีความสัมพันธ์กับความถี่ของคลื่นที่ผสมอยู่เป็นแถบกว้างที่ไม่ปรากฏยอดแหลมเด่นชัด และเมื่อนำไปคูณกับ aerodynamic admittance function จะได้ผลที่มีค่าน้อยลงสำหรับช่วงความถี่สูง และในการคำนวณผลตอบสนอง เมื่อนำสเปกตรัมของแรงลมคูณกับกำลังสองของตัวคูณขยายทางพลวัติที่มียอดแหลมที่บริเวณค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร ผลคูณจะปรากฏยอดแหลมที่บริเวณค่าความถี่ธรรมชาติเช่นกัน
- พื้นที่ใต้กราฟของผลตอบสนองที่ได้จากผลคูณของสเปกตรัมของแรงลมกับกำลังสองของตัวคูณขยายทางพลวัติคือค่าความแปรปรวน และค่ารากที่สองคือค่าที่ใช้แสดงในรูป σ/μ ในการหาพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวนิยมทำการพิจารณาพื้นที่เป็นสองส่วน คือ พื้นที่ในส่วนที่เป็นแถบกว้างที่สามารถหาพื้นที่ได้จากการอินติเกรดเชิงตัวเลข โดยเรียกว่าส่วนกึ่งสถิต (quasi-static) หรือพื้นหลัง (background) ซึ่งแทนด้วยเทอม B ในสมการที่ อ.3-3 (สมการที่ (3-5))และพื้นที่บริเวณยอดแหลมของค่าความถี่ธรรมชาติที่หาพื้นที่จากหลักคณิตศาสตร์ขั้นสูง โดยเรียกว่าส่วนกำทอน (resonant) ซึ่งแทนด้วยเทอม sF/β ในสมการที่ อ.3-3 (สมการที่ (3-5)) โดยที่พื้นที่ทั้งสองส่วนนี้แสดงถึงลักษณะของปัญหาลมว่าผลการตอบสนองหลักมาจากส่วนกึ่งสถิตหรือการตอบสนองเชิงพลศาสตร์จากส่วนกำทอน

นอกจากนั้น ค่าประกอบในเทอม K/C_{eH} มีอยู่เพื่อการรวมผลของระดับความปั่นป่วนของลม

การคำนวณด้วยหลักค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลมสำหรับแรงลมและผลตอบสนองในทิศทางลมนี้ได้รับการยอมรับนำไปใช้เป็นพื้นฐานในมาตรฐานสากลทั่วโลก ตัวอย่างเช่น มาตรฐาน National Building Code ของประเทศแคนาดา ฉบับปี ค.ศ. 2005 (NBCC-2005) มาตรฐาน American Society of Civil Engineers 7 ของประเทศสหรัฐอเมริกา ฉบับปี ค.ศ. 2005 (ASCE 2005) มาตรฐาน Architectural Institute of Japan ของประเทศญี่ปุ่น ฉบับปี ค.ศ. 2004 (AIJ 2004) และมาตรฐาน Australian/New Zealand Standard ของประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ ฉบับปี ค.ศ. 2002 (AS/NZS 2002) เป็นต้น โดยการคำนวณผลของลมในทิศทางลมของแต่ละมาตรฐานตั้งอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดหลักค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลมเดียวกัน แต่มีประเด็นที่แตกต่างกันด้านการนิยามรายละเอียดของลักษณะของลม และความสัมพันธ์ของลมกับโครงสร้าง (Zhou และคณะ 2000) และสำหรับมาตรฐานนี้ ได้พิจารณาเปรียบเทียบความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับประเทศไทย ในด้านความถูกต้อง และรูปแบบของรายละเอียดในขั้นตอนคำนวณ โดยเปรียบเทียบมาตรฐานต่างๆ และผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมเพื่อประกอบการพิจารณาเลือกรูปแบบการคำนวณสำหรับมาตรฐานนี้ และได้ใช้ มาตรฐาน National Building Code ของประเทศแคนาดา ฉบับปี ค.ศ. 2005 (NBCC-2005) เป็นต้นแบบในการคำนวณค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าและผลตอบสนองในทิศทางลม

ข. คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารซึ่งประกอบด้วย ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (vibration mode shape) เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการคำนวณหาแรงเพื่อการออกแบบและการประเมินระดับการโยกตัวของอาคารต่างๆ เนื่องจากผลของแรงภายนอกในลักษณะพลวัติ ซึ่งสำหรับปัญหาของแรงลมคือ แรงเนื่องจากลมปั่นป่วนที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา

มาตรฐานนี้ ได้เสนอค่าที่แนะนำให้ใช้ในการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลหรือแนวทางอื่นเพื่อใช้ในการกำหนดค่าในขั้นตอนการคำนวณแรงลมเพื่อการออกแบบ โดยเสนอค่าสำหรับความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหวทางด้านข้างของอาคารและแนวการบิดตัวของอาคาร และค่าอัตราส่วนความหน่วง โดยค่าที่เสนอดังกล่าว มาจากผลการวิจัยการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในกรุงเทพมหานคร ด้วยการตรวจวัดสภาพการสั่นไหวตามธรรมชาติของอาคาร ซึ่งได้ทำการศึกษากับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กรวมทั้งสิ้น 50 หลัง ที่มีความสูงตั้งแต่ 20 ถึง 210 เมตร และมีจำนวนชั้น 5 ถึง 54 ชั้น (นคร ภู่วโรดม และคณะ 2548)

ความถี่ธรรมชาติ

ความถี่ธรรมชาติคือจำนวนรอบของการสั่นไหวที่เกิดขึ้นในหนึ่งช่วงเวลา แสดงถึงจังหวะที่โครงสร้างมีแนวโน้มที่จะสั่นไหวหลังจากเกิดการกระตุ้นจากแรงภายนอก ค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (รูปแบบการสั่นไหวแรก) เป็นค่าที่สำคัญในการประเมินผลการตอบสนอง รวมทั้งระดับความรุนแรงของผลการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่รวมอยู่ในการตอบสนองโดยรวม (มาตรฐาน ASCE 7-05 และ AS/NZS 2002 จำแนกอาคารที่มีความถี่ธรรมชาติของอาคารน้อยกว่า 1 Hz. เป็นอาคารที่มีความอ่อนตัวและมีผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่มีนัยสำคัญ) ข้อมูลจากการตรวจวัดในรูปของค่าความถี่ธรรมชาติ ได้ถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์เพื่อเป็นสูตรสำหรับการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติกับความสูงของอาคาร และสำหรับการนำไปใช้ในเรื่องการออกแบบต้านทานแรงลม สูตรการประมาณที่เลือกใช้คือค่าขอบเขตล่างของความถี่ธรรมชาติ เพื่อให้ผลจากการใช้สูตรประมาณดังกล่าวทำให้การคำนวณค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมและแรงลมเพื่อการออกแบบมีสัดส่วนความปลอดภัยเพิ่มขึ้น โดยผลการศึกษาและการวิเคราะห์การถดถอยทำให้มีการเสนอค่าความถี่ธรรมชาติสำหรับการสั่นไหวทางด้านข้างของอาคารเท่ากับ $44/H$ โดยที่ H คือความสูงของอาคารมีหน่วยเป็นเมตร ซึ่งค่านี้สามารถใช้ในการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารในการสั่นไหวในทิศทางลม (n_D) และในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (n_W) สำหรับการสั่นไหวแนวบิด ผลการศึกษาเสนอค่าที่ใช้ประมาณค่าความถี่ธรรมชาติ (n_T) เท่ากับ $55/H$

อัตราส่วนความหน่วง

ความหน่วงคือคุณสมบัติด้านการสลายพลังงานเนื่องจากการสั่นไหวของโครงสร้าง และเกิดจากหลายองค์ประกอบ เช่น วัสดุ รอยต่อ สภาพแวดล้อม เป็นต้น ในการประยุกต์ใช้โดยทั่วไปใช้สมมุติฐานของแรงที่เกิดจากความหน่วงแปรผันตรงกับความเร็วของการสั่นไหว และนิยมพิจารณาค่าเป็นอัตราส่วนความหน่วง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วย สำหรับค่าอัตราส่วนความหน่วงจากผลการตรวจวัดมีค่ากระจายตัวในช่วงประมาณ 0.005 ถึง 0.015 เป็นส่วนมาก และไม่พบแนวโน้มของความสัมพันธ์กับข้อมูลทางกายภาพของอาคาร

ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ดังกล่าวเป็นผลการศึกษาในประเทศ ซึ่งค่าอาจมีความแตกต่างจากค่าที่กำหนดในมาตรฐานจากต่างประเทศ นอกจากนั้น ผลการวิจัยที่นำมาใช้ในมาตรฐานนี้ มาจากการศึกษากับอาคารประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้น ซึ่งสำหรับอาคารที่เป็นโครงสร้างเหล็กค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์อาจแตกต่างไปได้ โดยทั่วไปแล้วสำหรับอาคารที่เป็นโครงสร้างเหล็กมีค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารคอนกรีต ตัวอย่างเปรียบเทียบได้แก่ ในส่วนของคำอธิบายในมาตรฐาน ASCE 7-05 ได้เสนอสูตรการประมาณ

ค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกันระหว่างอาคารโครงสร้างเหล็กและอาคารโครงสร้างคอนกรีต โดยที่ สำหรับอาคารที่สูงไม่เกิน 100 เมตร ความถี่ธรรมชาติจากสูตรประมาณของอาคารคอนกรีตมีค่าเป็นประมาณ 1.1 ถึง 1.4 เท่าของค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารโครงสร้างเหล็ก และสำหรับอาคารที่สูงกว่า 100 เมตร ความแตกต่างระหว่างความถี่ธรรมชาติของอาคารทั้งสองประเภทมีค่าน้อยลง ส่วนงานวิจัยที่ศึกษาในประเทศญี่ปุ่น (Satake และคณะ 2003) ทำการตรวจวัดอาคารทั้งสองประเภทจำนวนมาก พบว่าในช่วงความสูงถึง 150 เมตร ค่าเฉลี่ยของค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารคอนกรีตมีค่าเป็นประมาณ 1.33 เท่าของค่าสำหรับอาคารโครงสร้างเหล็ก

คำอธิบาย บทที่ 4

การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าและการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

4.1 การกำหนดค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าและผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าการคำนวณแรงลมในทิศทางลม

แรงลมและผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิดที่เกิดจากลมมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากทฤษฎีการสั่นแบบสุ่มที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองในทิศทางลม สำหรับอาคารสูงหรือมีความอ่อนตัวมาก ผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิดอาจมีค่ามากกว่าผลตอบสนองในทิศทางลมได้ทั้งสำหรับสภาวะจำกัดด้านกำลังและสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน (Kareem 1985) โดยที่แนวทางการวิเคราะห์ผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิดที่เสนอในมาตรฐานนี้ได้มาจากการพิจารณาเปรียบเทียบความเหมาะสมจาก มาตรฐาน Architectural Institute of Japan ของประเทศญี่ปุ่น ฉบับปี ค.ศ. 2004 (AIJ 2004) มาตรฐาน Australian/New Zealand Standard ของประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ ฉบับปี ค.ศ. 2002 (AS/NZS 2002) งานวิจัยของ Gu และ Quan (2004) งานวิจัยของ Zhou และคณะ (2003) และผลการทดสอบในอุโมงค์ลมที่มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และได้สรุปใช้มาตรฐาน Architectural Institute of Japan ของประเทศญี่ปุ่น ฉบับปี ค.ศ. 2004 (AIJ 2004) เป็นมาตรฐานต้นแบบในการคำนวณค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าและผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

ทฤษฎีพื้นฐานของการคำนวณในส่วนนี้เป็นการใช้แนวคิด gust loading factor แบบใหม่ ซึ่งสรุปประเด็นสำคัญโดย Kareem and Zhou (2003) โดยประมาณค่าสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นของโมเมนต์รวมที่ฐาน $\hat{\mathbf{M}}$ (โมเมนต์พลิกคว่ำ หรือโมเมนต์บิด) ดังนี้

$$\hat{\mathbf{M}} = \overline{M} + g_p \sigma_{\mathbf{M}} \qquad \text{(อ.4-1)}$$

โดยที่ $\overline{M}$ คือค่าเฉลี่ยของโมเมนต์รวมที่ฐาน g_p คือค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด และ $\sigma_{\mathbf{M}}$ คือ RMS ของโมเมนต์รวมที่ฐาน (ที่รวมผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของอาคารเข้าไว้) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ power spectrum density ของโมเมนต์รวมที่ฐาน และด้วยแนวคิดในทำนองเดียวกับผลของแรงลมในทิศทางลม การหาพื้นที่ใต้

กราฟทำด้วยการแยกหาเป็น 2 ส่วนคือส่วนกึ่งสถิตและส่วนกำทอน ในการหาค่าในส่วนกึ่งสถิตจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของค่า RMS ของโมเมนต์รวมที่ฐาน C' (ที่ไม่รวมผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของอาคาร คือส่วนกึ่งสถิต) และในการหาค่าส่วนกำทอนจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของค่าสเปกตรัมของโมเมนต์รวมที่ฐานที่ตำแหน่งความถี่ธรรมชาติของอาคาร $F(n)$ (ที่ยังไม่รวมผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของอาคาร) ร่วมกับคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ผลการตอบสนองรวมในรูปโมเมนต์ที่ฐานได้จากการรวมผลตอบสนองเฉลี่ยกับผลรวมแบบ square root of the sum of the square (SRSS) ของค่าจากส่วนกึ่งสถิตและส่วนกำทอน จากนั้นโมเมนต์รวมที่ฐานที่คำนวณได้สามารถนำไปกระจายเป็นแรงสถิตเทียบเท่าที่กระทำทางด้านข้างของอาคารด้วยหลักการเดียวกับแนวคิดสำหรับการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ผลตอบสนองของอาคารที่เกิดขึ้นก็สามารถคำนวณต่อไปด้วยหลักพลศาสตร์โครงสร้าง สำหรับค่าสำคัญต่อการคำนวณคือ C' และ $F(n)$ ได้จากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมกับแบบจำลองที่มีรูปทรงภายนอกเหมือนอาคารจริงและวัดโมเมนต์ที่ฐานด้วยหลักการ High-Frequency-Force-Balance (HFFB) และด้วยผลจากการทดสอบกับอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้สามารถกำหนดเป็นสมการในการคำนวณค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการออกแบบได้ โดยแสดงในรูปของค่า RMS ของโมเมนต์รวมที่ฐานในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและในแนวบิด (C'_L และ C'_T) ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับอัตราส่วนด้านลึกต่อด้านกว้างของอาคาร (D/W) และค่าสเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและในแนวบิดของอาคาร (F_L และ F_T) ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับค่าความถี่ธรรมชาติลดรูป $\left(n_w\sqrt{WD}/V_H\right)$

4.2 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

สำหรับผลการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมมีสาเหตุที่แตกต่างจากผลการตอบสนองในทิศทางลม กล่าวคือผลการตอบสนองในทิศทางลมเกิดขึ้นจากผลของความปั่นป่วน (turbulence) ในธรรมชาติของลม แต่สำหรับผลการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมเกิดขึ้นจากความปั่นป่วนของลมและระลอกลมที่เกิดเมื่อลมพัดผ่านโครงสร้างแล้วทำให้เกิดความผันผวนของแรงในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม พฤติกรรมในการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคารเป็นสำคัญ สมการการคำนวณผลของแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมมีที่มาจากการทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อวัดความผันผวนของค่าของโมเมนต์ที่ฐานเนื่องจากแรงในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม แบบจำลองที่ใช้ทดสอบเป็นแบบจำลองสำหรับอาคารที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมสม่ำเสมอ ที่มีอัตราส่วน $H/\sqrt{WD}$ ไม่เกิน 6 และอัตราส่วน D/W มีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 5 สำหรับอาคารที่มีรูปทรงแตกต่างไปจากที่กำหนด อาจใช้ผลการทดสอบความผันผวนและค่าสเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมจากอุโมงค์ลม และคำนวณแรงลมและผลตอบสนองได้ตาม

วิธีที่กำหนดไว้ในบทที่ 4 นอกจากนี้ สำหรับอาคารที่อาจเกิดการตอบสนองแบบ vortex-induced vibration หรือการเสียเสถียรภาพทางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic instability) ซึ่งอาจเกิดในโครงสร้างที่มีค่า $\frac{V_H}{n_w\sqrt{WD}} > 10$ การคำนวณผลของแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมควรใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมที่คำนึงถึงผลการตอบสนองเหล่านั้นไว้ด้วย

4.4 โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

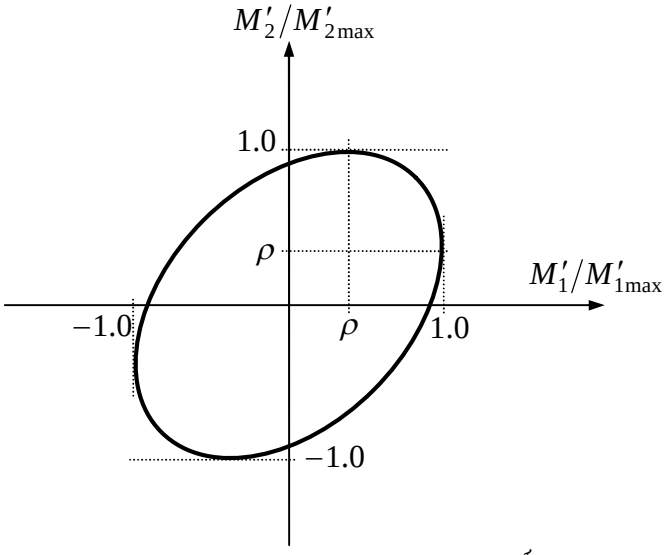
โมเมนต์บิดเนื่องจากลม มีสาเหตุมาจากความไม่สม่ำเสมอของแรงดัน (หรือแรงดูด) ที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง เนื่องจากลมที่กระทำต่ออาคารในแต่ละด้าน ทั้งนี้เกิดเนื่องจากความปั่นป่วนของลมและระลอกลมที่เกิดเมื่อลมพัดผ่านโครงสร้าง โมเมนต์บิดเนื่องจากลมมีลักษณะขึ้นกับรูปทรงของอาคารและพฤติกรรมของลม ดังนั้น วิธีที่ใช้ประมาณโมเมนต์บิดจึงมีที่มาจากข้อมูลความผันผวนของโมเมนต์บิดที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมดังที่ใช้สำหรับผลของแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม ข้อจำกัดของวิธีที่กำหนดไว้ในบทที่ 4 จึงมีลักษณะเดียวกับข้อจำกัดสำหรับการคำนวณผลของแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

4.5 การรวมผลของแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

เนื่องจากลักษณะการเกิดขึ้นของแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างมีความไม่สมมาตรบนพื้นที่หน้าตัดของอาคารแม้ในกรณีที่ลมปะทะตั้งฉากต่อพื้นผิวอาคาร ดังนั้น แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าที่เกิดขึ้นจึงมีค่าที่ไม่เป็นศูนย์เมื่อแรงลมในทิศทางลมเกิดขึ้นเป็นค่าสูงสุด ในมาตรฐานได้เสนอวิธีการคำนวณแรงลมในทั้งสามประเภทด้วยขั้นตอนที่ไม่สัมพันธ์กัน แต่มิได้หมายความว่าแรงแต่ละประเภทนี้ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน นอกจากนั้นในสภาพทั่วไปแล้วแรงเหล่านี้ก็ไม่ได้เกิดถึงค่าสูงสุดพร้อมกันเช่นกัน การออกแบบโดยใช้ค่าสูงสุดที่กำหนดในมาตรฐานของแรงทุกประเภทจึงอาจทำให้ได้ผลที่มากกว่าสภาพจริง ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาการรวมผลของแรงในทั้งสามประเภทอย่างเหมาะสมด้วย

ในอาคารสูงที่มีผลของแรงลมจากส่วนกำทอนมาก สำหรับอาคารที่มีหน้าตัดสมมาตรผลตอบสนองต่อแรงลมแต่ละด้านมีการกระจายตัวแบบปกติ และหากพิจารณาค่าความแปรปรวนของโมเมนต์พลิกคว่ำในแต่ละทิศทาง M_1' และ M_2' โดยอธิบายด้วยการกระจายตัวแบบปกติใน 2 มิติ ความสัมพันธ์เทียบเท่าของความน่าจะเป็นสามารถแสดงได้ด้วยเส้นรูปวงรีที่มีแกนเอียง และมีรูปร่างขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วม (correlation coefficient, ρ) โดยที่ ρ แสดงถึง

สัดส่วนของค่าสูงสุดของโมเมนต์พลิกคว่ำด้านหนึ่งเมื่อโมเมนต์พลิกคว่ำอีกด้านหนึ่งมีค่าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ อ.4.1



รูปที่ อ.4.1 ผลร่วมของแรง 2 ทิศทางจากการพิจารณาสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วม $(0 \le \rho \le 1.0)$

โดยที่ค่า ρ มีค่าตั้งแต่ 0 (ไม่มีความสัมพันธ์ร่วม หรือ เมื่อด้านหนึ่งเกิดค่าสูงสุด อีกด้านมีค่าเป็นศูนย์) ถึง 1.0 (มีความสัมพันธ์ร่วมอย่างสมบูรณ์ หรือ เกิดค่าสูงสุด-ต่ำสุดพร้อมกันทั้งสองด้าน)

การศึกษาในอดีตโดย Melbourne (1975) และคำอธิบายในมาตรฐาน AIJ (2004) แสดงไว้ว่า สำหรับโมเมนต์ที่เกิดจากแรงลมในทิศทางลมร่วมกับกับโมเมนต์ในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์ที่เกิดจากแรงลมในทิศทางลมร่วมกับกับโมเมนต์บิด มีความสัมพันธ์ร่วมกันน้อยมาก ดังนั้นใช้ $\rho = 0$ และค่า ρ สำหรับโมเมนต์ในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมกับโมเมนต์บิดใช้ค่า 1.0 สำหรับในมาตรฐาน เนื่องจากใช้สมมุติฐานว่าการเกิดขึ้นของค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กันสมบูรณ์

การรวมผลของแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า สามารถสรุปได้ คือให้พิจารณาผลการรวม แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า ในกรณีดังต่อไปนี้

ก. กรณีที่แรงลมในทิศทางลมเกิดขึ้นสูงสุด ให้ใช้ แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม ร่วมกับ ร้อยละ 40 ของแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และ ร้อยละ 40 ของโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

ข. กรณีที่แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม หรือโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า เกิดขึ้นสูงสุด ให้ใช้ $\left(0.4 + \frac{0.6}{C_g}\right)$ ของแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม ร่วมกับ แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

คำอธิบาย บทที่ 5
การทดสอบในอุโมงค์ลม

5.1 ขอบข่ายการใช้งาน และ

5.2 การทดสอบ

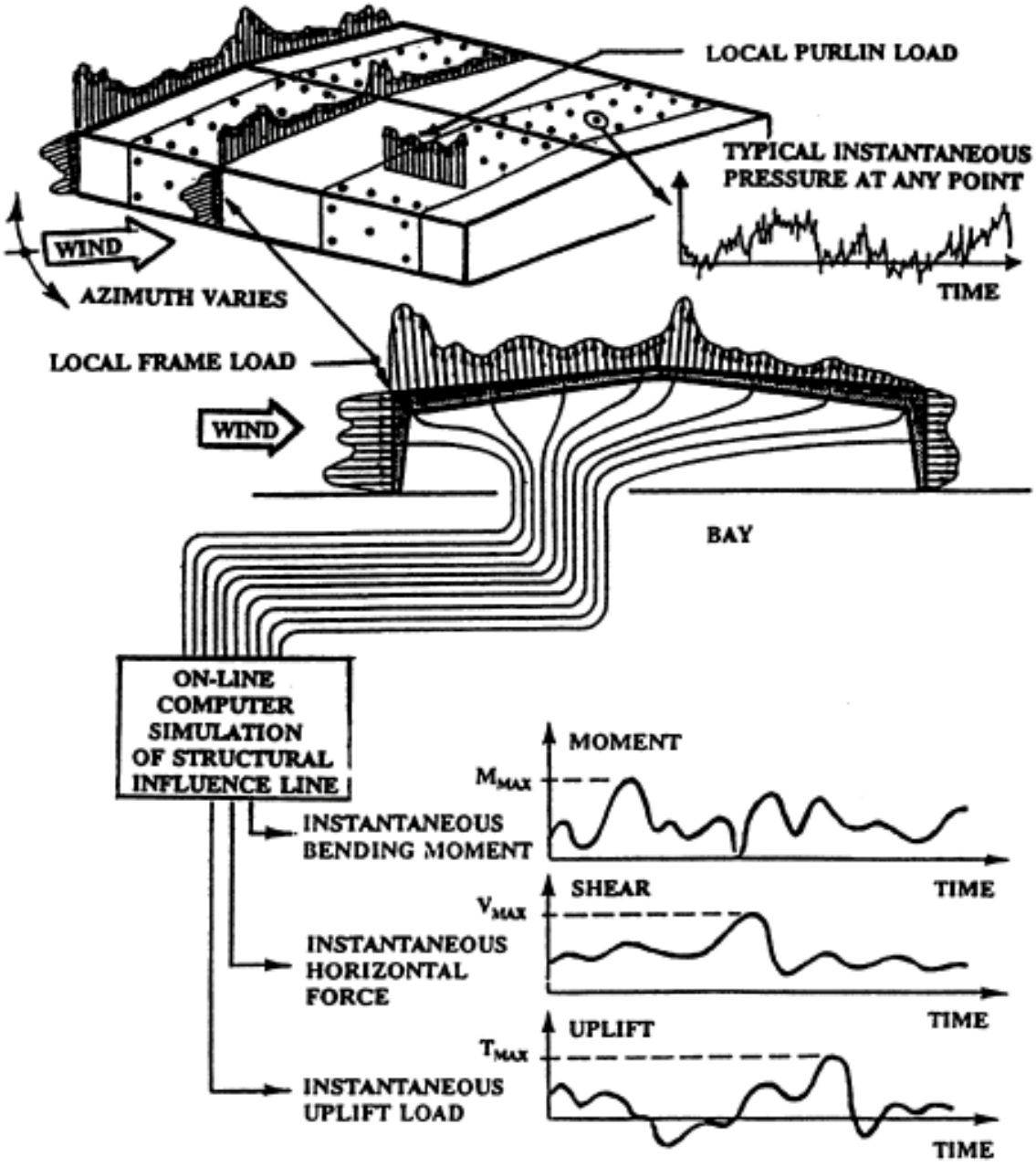
การทดสอบในอุโมงค์ลม (หรือการทดสอบโดยใช้ของไหลประเภทอื่น เช่น น้ำ) ที่ใช้เพื่อการคำนวณแรงลมสำหรับออกแบบอาคารและโครงสร้าง แบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ ดังแสดงในตารางที่ อ.5-1 (ASCE 1999)

ตารางที่ อ.5-1 ชนิดของการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างภายในอุโมงค์ลมและข้อมูลที่ได้

ชนิดของการทดสอบ	ข้อมูลที่ได้
<u>ความดันลม ณ จุดต่างๆของผนังโดยรอบของอาคาร (Local Pressure)</u> ทดสอบการผันผวนของความดันที่จุดต่างๆของโครงสร้างเนื่องจากลมโดยใช้แบบจำลองแข็งและติดตั้งหัววัดความดันจำนวนมาก (รูปที่ อ.5.1 และ อ. 5.2)	● ความดันลมภายนอกเฉลี่ยและความแปรปรวน ที่จุดต่างๆรอบอาคาร สำหรับการออกแบบผนังกระจก หรือส่วนตบแต่งภายนอก ● ผลของช่องเปิดที่มีต่อความดันลมภายในของอาคาร ● ค่าความดันสุทธิที่กระทำต่อส่วนต่างๆของผนังรอบอาคาร
<u>แรงลมที่กระทำต่อพื้นที่บางส่วนหรือทั้งหมดของอาคาร(Area and Overall Wind Loads)</u> ทดสอบแรงลมที่กระทำต่อพื้นที่ส่วนต่างๆของอาคารโดยใช้แบบจำลองในการหาความดันและทำการวิเคราะห์หาค่าแรงลมเฉลี่ยจากข้อมูลความดันที่จุดต่างๆในเวลาเดียวกัน (รูปที่ อ.5.1)	● ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของแรงลมที่กระทำกับพื้นที่ส่วนต่างๆของอาคารจากผลของทั้งความดันภายในและภายนอก ● แรงลมทั้งหมดที่กระทำกับอาคาร สะพานช่วงยาว หรือโครงสร้าง รวมถึงแรงที่กระทำในแต่ละรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานที่ต้องการ ● ข้อมูลของความดันลมที่ผนังภายนอกในหลายๆจุดของอาคารที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลาสามารถนำไปวิเคราะห์ค่าแรงกระทำทางด้านพลศาสตร์ในแต่ละรูปแบบการสั่นไหว เพื่อนำไปประมาณ

	ค่าผลตอบสนองต่อแรงลมของอาคาร รวมถึงการโก่งตัวด้านข้าง และอัตราเร่ง
High-Frequency Force Balance วัดแรงที่กระทำที่ฐานของแบบจำลองเพื่อนำไปประมาณค่าแรงและการตอบสนองที่เกิดขึ้นของโครงสร้างจริงโดยแบบจำลองที่ใช้ต้องสร้างให้มีความถี่ธรรมชาติสูงเพื่อไม่ให้มีผลของการตอบสนองแบบกำทอน(resonance)ต่อการแปรปรวนของลมในช่วงความถี่ที่สนใจ	• ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ค่าผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้าง • ค่าspectraของแรงลมที่กระทำเมื่อสามารถทราบค่าการตอบสนองแบบกำทอน (resonance) • วิธี High-Frequency Force Balance มักนิยมใช้ในการหาค่าแรงที่กระทำสำหรับการโก่งตัวด้านข้างและการบิดสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้น ฐานของอาคารสูง • สามารถนำแรงที่ได้จากการทดสอบนำไปวิเคราะห์หาผลตอบสนองของอาคารเช่น การโก่งตัวด้านข้างและอัตราเร่ง
Sectional Model Test ทดสอบแบบจำลองหน้าตัดบางส่วนของโครงสร้างที่ติดตั้งอยู่บนสปริงซึ่งเป็นการจำลองคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์มักใช้กับหน้าตัดโครงสร้างของสะพานช่วงยาว เช่นสะพานขึง และสะพานแขวน (รูปที่ อ.5.3)	• ค่าแรงลมและการตอบสนองทั้งแบบเฉลี่ยและแบบพลศาสตร์ • ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงที่เกิดจากการกระตุ้นของโครงสร้างเองภายใต้แรงลม(aerodynamic derivatives) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางด้าน aero -elastic
แบบจำลองยืดหยุ่น(Aeroelastic Model) ทดสอบแบบจำลองยืดหยุ่นโดยจำลองคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ ใช้กับอาคาร สะพาน และโครงสร้างรูปแบบต่างๆ (รูปที่ อ.5.4)	• ข้อมูลของการตอบสนองของอาคารโดยคำนึงผลของการสั่นไหวร่วมระหว่างโครงสร้างและลม (motion-dependent or aeroelastic forces) ซึ่งไม่สามารถหาได้โดยการทดสอบแบบสถิต • ค่าแรงลมและการตอบสนองของโครงสร้างทั้งแบบเฉลี่ยและแบบพลศาสตร์รวมทั้ง การโก่งตัวด้านข้าง การหมุน และ อัตราเร่งของโครงสร้าง • การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ควบคุมการสั่นไหวของอาคารทั้งในแบบแอคทิฟ (active)และแบบพาสสิฟ (passive) • ผลกระทำร่วมกันของแรงลมและแรงกระทำอื่นๆ

<u>ระดับของแรงลมต่อผู้สัญจร (Pedestrian Wind)</u> ทดสอบเพื่อประเมินทิศทางและความรุนแรงของลมที่มีผลต่อผู้ที่สัญจรบริเวณรอบๆ โครงสร้างโดยใช้แบบจำลองย่อส่วนแบบสถิต	• ลักษณะการเคลื่อนที่และการไหลของลมรอบอาคารหรือโครงสร้าง • ทิศทางและความรุนแรงของลมจากผลของอาคารเพื่อศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมก่อนการดำเนินการโครงการ รวมถึงการปรับปรุงและแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากอาคาร
<u>ระดับคุณภาพของอากาศ (Air Quality)</u> ทดสอบเพื่อประเมินการแพร่กระจายของก๊าซต่างๆ หรือมลพิษที่แพร่ออกสู่สิ่งแวดล้อมของแหล่งอุตสาหกรรมรอบอาคารหรือที่สภาพภูมิประเทศต่างๆและคุณภาพของอากาศในเมืองใหญ่	• ลักษณะการแพร่กระจายของก๊าซต่างๆหรือมลพิษ • ผลกระทบการแพร่กระจายจากผลของลมในภูมิประเทศต่างๆ
<u>การจำลองสภาพภูมิประเทศ (Terrain and Topographic Test)</u> การทดสอบแบบจำลองย่อส่วนขนาดเล็กของสภาพภูมิประเทศแบบต่างๆ โดยใช้ flow visualization, hot-wire anemometry หรือทั้ง 2 แบบ	• ลักษณะการไหลของลมบริเวณภูมิประเทศแบบต่างๆรวมถึงการประเมินหาค่าความขรุขระของพื้นที่ • ค่าความสัมพันธ์ของการไหลของลมที่ตำแหน่งและความสูงต่างๆเพื่อใช้ในการเทียบสอบข้อมูลของสถานีวัดอากาศ • การประเมินค่าพลังงานศักย์ของลม ณ จุดที่ตั้งของโครงการ



รูปที่ อ.5.1 แรงลมที่ผันผวนที่กระทำกับผนังภายนอก โครงสร้างรองและโครงสร้างหลักของอาคารเตี้ย (Davenport et al. 1978)

ก. แบบจำลองย่อส่วนของอาคารและอาคารข้างเคียงในอุโมงค์ลม

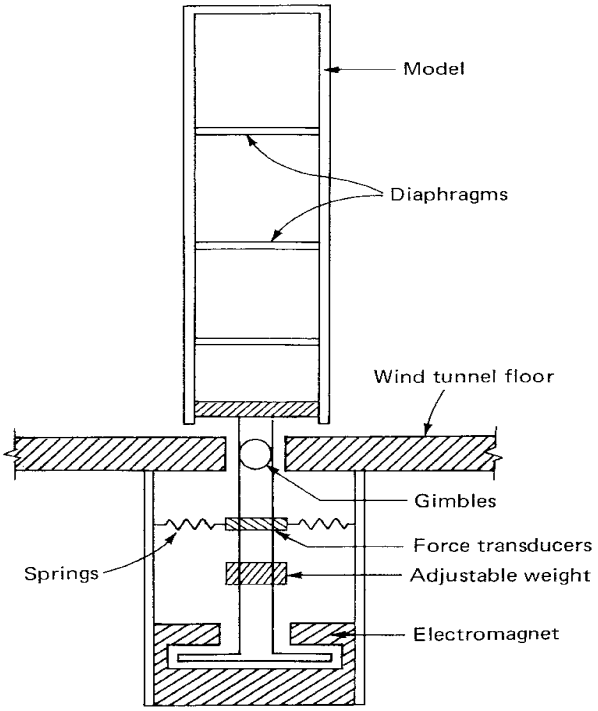
ข. แบบจำลองแข็ง ที่ติดตั้งท่อส่งแรงดัน เพื่อวัดความดันลมที่จุดต่างๆ ของผนังโดยรอบอาคาร

รูปที่ อ.5.2 ตัวอย่างแบบจำลองแข็งเพื่อวัดความดันลมในอุโมงค์ลม (Boonyapinyo et al. 2006)

ก. แบบจำลองหน้าตัดสะพานบางส่วนในอุโมงค์ลม

ข. แบบจำลองหน้าตัดสะพานที่ติดตั้งอยู่บนสปริง เพื่อจำลองคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์

รูปที่ อ.5.3 ตัวอย่างแบบจำลองของสะพานแบบ Sectional model (วิโรจน์ บุญญภิญโญ และ กำธร เจนศุภเสรี 2550)



รูปที่ อ.5.4 แบบจำลองยืดหยุ่นของอาคาร

บรรณานุกรม

1. AIJ (2004), Recommendation for Loads on Buildings, Architectural Institute of Japan.
2. ASCE (1999), Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. No.67, Task Committee on Wind Tunnel Testing of Buildings and Structures, American Society of Civil Engineers, New York.
3. ASCE (2002), ASCE7-02: Minimum Design Load for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, New York.
4. ASCE (2005), ASCE7-05: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, New York.
5. Atkinson, G.D. (1971), Forecasters' Guide to Tropical Meteorology, Technical Report 240, Air Weather Service (MAC), United States Air Force.
6. Australian Standard (2002), Minimum Design Loads on Structures: Part 2 Wind Loads, Standards Australia, Sydney.
7. Boonyapinyo V., Poovarodom N., Janesupasaeree K. and Klaharn P. (2006), Wind Load Study for Cladding Design of Central World Hotel by Wind Tunnel Test, Final Report, Civil Engineering Department, Thammasat University, Thailand, Submitted to Kim Yoo Seng Co., Ltd.
8. Davenport, A.G. (1964), Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading, Proceedings, Institution of Civil Engineers, Vol. 28, pp.187-196
9. Davenport, A.G. (1967), Gust loading factors, J. Struct. Div., ASCE, Vol. 93, No. 3, pp. 11-34
10. Davenport, A.G., Surry, D., and Stathopoulos, T. (1978), Wind Load on Low-Rise Building, Final Report on Phase III, BLWT-SS4, University of Western Ontario, Canada
11. Durst, C.S. (1960), Wind Speed Over Short Periods of Time, Meteorol. Mag., Vol. 89, pp. 181-186
12. Ellingwood B. R. and Takie P. B. (1999), Wind Load Statistics for Probability-Based Structural Design, J. Structural Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 453-463

13. Gu M. and Quan Y. (2004), Across-wind loads on typical tall buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 92, pp. 1147-1165

14. ISO (1986), ISO2394 - General Principles on Reliability for Structures, Geneva, 18 pp.

15. ISO (1997), ISO4354 – Wind Actions on Structures, International Organization for Standardization, Switzerland.

16. Kareem A. (1985), Lateral-torsional motion of tall buildings to wind loads, J. Struct. Eng., ASCE Vol. 111 No. 11, pp. 2479-2496

17. Kareem, A. and Zhou, Y. (2003), Gust Loading Factor-Past, Present and Future, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 91, pp. 1301-1328

18. Letchford C.W. (2001), Wind Loads on Rectangular Signboards and Hoardings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 89, pp. 135-151.

19. Lukkunaprasit, P., Pheinsusom, P., and Euasiriwam, N., (1995), Wind Loading for Tall Building Design in Thailand, Proc. of 2nd National Convension on Civil Engineering, Chiangmai, Thailand, pp. 51-61(in Thai).

20. Melbourne, W.H. (1975), Probability Distributions of Response of BHP House to Wind Action and Model Comparisons, Journal of Industrial Aerodynamics, Vol. 1, pp. 167-175

21. Mikitiuk, M., Surry, D., Lukkunaprasit, P., and Euasiriwan, N. (1995), Probability Based Wind Loadings for the Design of Transmission Structures, Part A-A Study of The Wind Climate for Thailand, Joint Research Report by Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, University of West Ontario and Chulalongkorn University, Thailand, CU/CE/EVR 1995.001.

22. NBCC (2005), National Building Code of Canada, Canadian Commission on Building and Fire Codes, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.

23. Palutikof, J.P., Brabson, B.B., and Adcock, S.T. (1999), A Review of Methods to Calculate Extreme Wind Speeds, Meteorol. Appl. Vol. 6, pp.119-132.

24. Plante, R.J. and Guard, C.P.(1990), 1989 Annual Tropical Cyclone Report, U.S. Naval Oceanography Command Center, Joint Typhoon Warning Center.

25. Poemsantitham K. (2005), Interference Effects from Adjacent Structures on Wind-included Forces in Large Billboards, M. Eng. Thesis No. ST-05-5, Asian Institute of Technology, Thailand.

26. Poovarodom, N., Warnitchai, P., Petcharoen, C., Yinghan, P. and Jantasod, M. (2004), Dynamic Characteristics of Non-Seismically Designed Reinforced Concrete Buildings with Soft Soil Condition in Bangkok, Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver BC, Canada. Paper No. 1264, Oxford: Pergamon.

27. Satake, N., Suda, K., Arakawa, T., Sasaki, A. and Tamura, Y. (2003), Damping Evaluation Using Full-Scale Data of Buildings in Japan, J. Struct. Eng., ASCE Vol. 129 No. 4, pp. 470-477.

28. Simiu E., Scanlan R. H. (1996), Wind Effects on Structures, 3rd Edition, Wiley, New York.

29. Sintuwong S. (2004), Wind Tunnel Model Test of Large Rectangular Billboards, M. Eng. Thesis No. ST-04-1, Asian Institute of Technology, Thailand.

30. Warnitchai P. and Sinthuwong S. (2006), Wind Tunnel Model Tests of Large Billboard Structures, Proceedings of EASCE-10, Bangkok, Thailand.

31. Zhou, Y., Kijewski, T., and Kareem, A. (2002), Along-wind load effects on tall buildings: comparative study of major International codes and standards, J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 128(6), pp. 788-796.

32. Zhou, Y., Kijewski, T., and Kareem, A. (2003), Aerodynamic loads on tall buildings: Interactive database, J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 129 (3), pp. 394-404.

33. ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล (2548), การทดสอบในอุโมงค์ลมสำหรับป้ายโฆษณาที่มีผลของอาคารข้างเคียง, วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

34. นคร ภู่วโรดม, เป็นหนึ่ง วานิชชัย และ วิโรจน์ บุญญภิญโญ (2550),การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าและการตอบสนองโดยวิธีการอย่างละเอียดสำหรับอาคารสูง เพื่อการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงลม, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, บทความ STR-098

35. นคร ภู่วโรดม, มานะ จันทะสด และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย (2548) คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 16 ฉบับที่ 2

36. นเรศ ลิมสัมพันธ์เจริญ, เป็นหนึ่ง วานิชชัย, วิโรจน์ บุญญภิญโญ และ นคร ภู่วโรดม (2550), ความเร็วลมอ้างอิงในการออกแบบอาคารสำหรับประเทศไทย, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, บทความ STR-097

37. ปราณี ว่องวิทวัส (2532), พายุหมุนเขตร้อนที่เข้าสู่ประเทศไทย, เอกสารวิชาการเลขที่ 551.166.4-01-2532 . กรมอุตุนิยมวิทยา

38. ว.ส.ท. (2546), E.I.T.1018-46 - มาตรฐานการคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบอาคาร, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

39. วิโรจน์ บุญญภิญโญ และ กำธร เจนศุภเสรี (2550), การวิเคราะห์และออกแบบอากาศพลศาสตร์ของสะพานขึง/ แขวน โดยเคเบิล ด้วยการทดสอบในอุโมงค์ลม, รายงานประจำปีที่ 1, ทุนเพิ่มขีดความสามารถด้านการวิจัยของอาจารย์รุ่นกลางในสถาบันอุดมศึกษา เสนอสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

40. วิโรจน์ บุญญภิญโญ, ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์, สมชาย ชูชีพสกุล, เป็นหนึ่ง วานิชชัย, นคร ภู่วโรดม, สุกิตย์ เทพมังกร, นเรศ ลิมสัมพันธ์เจริญ และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ (2550 ก), งานวิจัยย่อยที่ 1 เรื่องแผนที่ความเร็วลมอ้างอิงสำหรับการออกแบบอาคารของประเทศไทย โครงการการวิเคราะห์หน่วยแรงลมที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆของอาคาร ตามสภาพแวดล้อมเพื่อปรับปรุงกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) เสนอสำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง

41. วิโรจน์ บุญญภิญโญ, ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์, สมชาย ชูชีพสกุล, เป็นหนึ่ง วานิชชัย, นคร ภู่วโรดม, สุกิตย์ เทพมังกร, นเรศ ลิมสัมพันธ์เจริญ และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ (2550 ข), งานวิจัยย่อยที่ 3 เรื่องการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมโดยวิธีวัดความดันลม โครงการการวิเคราะห์หน่วยแรงลมที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆของอาคาร ตามสภาพแวดล้อมเพื่อปรับปรุงกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) เสนอสำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง

42. วิโรจน์ บุญญภิญโญ, เป็นหนึ่ง วานิชชัย, นคร ภู่วโรดม, นเรศ ลิมสัมพันธ์เจริญ, สุกิตย์ เทพมังกร, ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์, สมชาย ชูชีพสกุล และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ (2550 ค), การพัฒนามาตรฐานการคำนวณแรงลม สำหรับการออกแบบอาคารของประเทศไทย ฉบับใหม่, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, บทความ STR-075

43. วารสารอุตุนิยมวิทยา (2549), ฉบับที่ 1, กรมอุตุนิยมวิทยา หน้า 4-8.

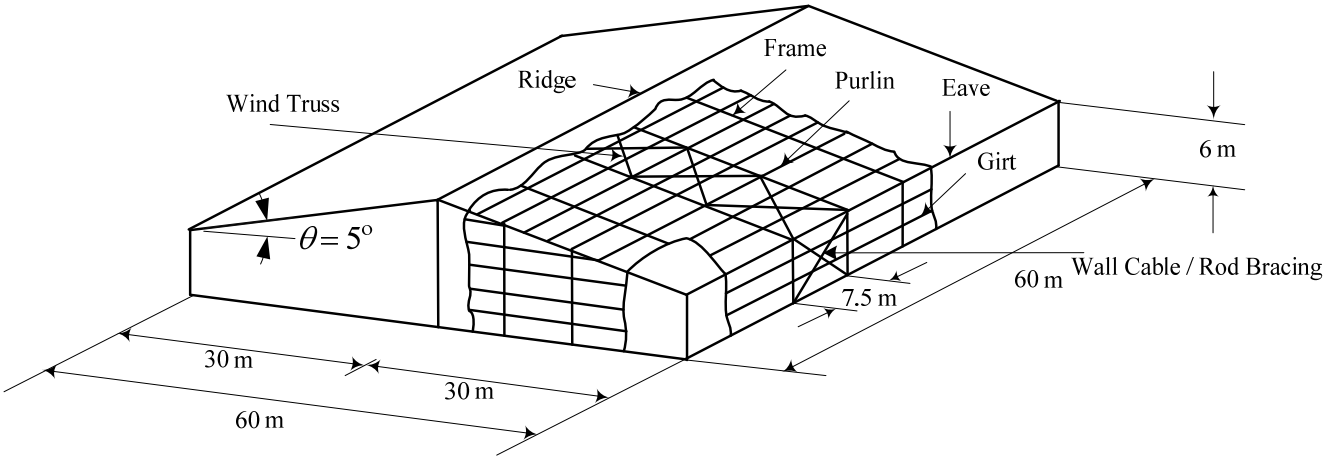
44. สุวรรณสาม ศรีวิเชียร (2546), แรงลมสำหรับออกแบบป้ายโฆษณา, วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ส่วนที่ 3
ตัวอย่างการคำนวณแรงลมและการตอบสนอง

ตัวอย่างการคำนวณแรงลมและการตอบสนอง ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐาน แต่มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อให้ผู้ใช้มีความเข้าใจในการใช้มาตรฐานได้ดียิ่งขึ้น

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับอาคารเตี้ย โดยวิธีการอย่างง่าย

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณแรงลมสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักและโครงสร้างรองของอาคารเตี้ย ลักษณะโดยทั่วไปและขนาดขององค์อาคารสำหรับโครงสร้างหลักและโครงสร้างรองในการต้านทานแรงลมของอาคารตัวอย่างมีดังต่อไปนี้



รูปที่ ต.1.1 ลักษณะของอาคารตัวอย่าง

- อาคารตัวอย่างนี้ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง และต้องออกแบบให้รับแรงลมที่เกิดจากความเร็วลมอ้างอิง 25 เมตรต่อวินาที
- ด้านที่ขนานกับสันหลังคา มีความยาว 60 เมตร
- ด้านที่ตั้งฉากกับสันหลังคา มีความยาว 60 เมตร
- ความชันของหลังคามีค่า 1:11.5 ($\theta = 5.0^\circ$)
- ความสูงของชายคา (eave height) เท่ากับ 6 เมตรเหนือพื้นดิน
- ความสูงเฉลี่ยของหลังคา เท่ากับ 7.31 เมตร

  (หมายเหตุ: ในมาตรฐานฯ กำหนดไว้ว่า ในกรณีที่ค่า $\theta < 7\text{-}10^\circ$ อาจจะเลือกใช้ความสูงของชายคา (eave height) แทนความสูงเฉลี่ยของหลังคาในการคำนวณได้ แต่สำหรับกรณีของตัวอย่างนี้ ใช้ค่าความสูงเฉลี่ยของหลังคาในการคำนวณ เนื่องจากอาคารมีความกว้างมาก)
- อาคารมีประตู หน้าต่าง และช่องเปิดเพื่อระบายอากาศ รวมทั้งหมดคิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 5% ของพื้นผิวทั้งหมดของอาคาร ประตูและหน้าต่างมีขนาดใหญ่และไม่สามารถต้านทานพายุได้ และช่องเปิดมีลักษณะกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ (non-uniformly distributed) โดยรอบอาคาร

- โครงสร้างต้านแรงลมของอาคาร มีลักษณะดังต่อไปนี้
    - ระยะห่างระหว่างโครงข้อแข็งแต่ละตัว เท่ากับ 7.5 เมตร
    - ความยาวของโครงเคร่าของผนังอาคาร (girt) และ แปของหลังคา (purlin) ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างโครงข้อแข็ง มีค่าเท่ากับ 7.5 เมตร
    - ระยะห่างของโครงคร่าวของผนัง (girt spacing) เท่ากับ 2 เมตร
    - ระยะห่างของแปหลังคา (purlin spacing) เท่ากับ 1.5 เมตร
- โครงสร้างของหลังคา มีลักษณะดังต่อไปนี้
    - แผ่นเหล็กมุงหลังคา (roof cladding panel) มีความกว้างเท่ากับ 60 เซนติเมตร
    - ระยะห่างของตัวยึดแผ่นเหล็กมุงหลังคาบนแป (roof fastener spacing) เท่ากับ 30 เซนติเมตร
- ผนังอาคาร มีลักษณะดังต่อไปนี้
    - ขนาดของแผ่นเหล็กมุงผนัง (façade wall) มีความกว้างเท่ากับ 60 เซนติเมตร และมีความยาวเท่ากับ 600 เซนติเมตร
    - ระยะห่างของตัวยึดแผ่นเหล็กมุงผนังบนโครงเคร่า (façade wall fastener spacing) เท่ากับ 30 เซนติเมตร

วิธีทำ

1. หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^2 = \frac{1}{2}\times 1.25\times 25^2 = 390.6 \text{ นิวตัน/ม.}^2$$

2. ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ความสูงอ้างอิงของอาคารเตี้ย (low-rise building) สำหรับการคำนวณค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ คือ ความสูงเฉลี่ยของหลังคาเหนือพื้นดิน แต่ต้องไม่น้อยกว่า 6 เมตร ในกรณีนี้ความสูงเฉลี่ยของอาคารเท่ากับ $6+15\tan 5^{\text{O}} = 7.31$ เมตร ดังนั้นค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) จะมีค่าเท่ากับ

$$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} = \left(\frac{7.31}{10}\right)^{0.2} = 0.94 \ \geq 0.9 \text{ ใช้ได้}$$

3. ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกลม และค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร (C_{gi} C_{pi})

สำหรับอาคารตามตัวอย่างนี้ เมื่อพิจารณาตามข้อกำหนดที่เกี่ยวกับหน่วยแรงลมภายในอาคารแล้ว จะพบว่า อาคารดังกล่าวนี้จัดอยู่ในกรณีที่ 3 (ดูหัวข้อที่ 2.6 ในมาตรฐานฯ) เนื่องจากมีช่องเปิดคิดเป็นสัดส่วนมากกว่า 0.1% ของพื้นที่ทั้งหมด มีประตูและหน้าต่างขนาดใหญ่ และไม่สามารถต้านทานพายุได้ และลักษณะของช่องเปิดกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอรอบอาคาร

ดังนั้นจึงใช้ต้องเลือกใช้ค่า $C_{pi} = \pm 0.7$ และ $C_{gi} = 2.0$ สำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงลมภายในอาคาร ตามสมการ $p_i = I_w q C_e C_{gi} C_{pi}$ โดยที่ $I_w = 1$

ดังนั้นหน่วยแรงลมภายในอาคาร จะมีค่าเท่ากับ

$$p_i = I_w q C_e C_{gi} C_{pi} = 1 \times 390.6 \times 0.94 \times 2 \times (\pm 0.7) = \pm 514.0 \text{ นิวตัน/ม.}^2$$

ค่าหน่วยแรงลมภายในอาคารซึ่งมีทั้งค่าบวกและลบที่คำนวณได้นี้ จะถูกนำไปรวมกับค่าหน่วยแรงลมภายนอกอาคารเพื่อคำนวณหาค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับการออกแบบในหัวข้อต่อไป

4. การคำนวณค่าหน่วยแรงลมสุทธิ

4.1 การคำนวณค่าหน่วยแรงลม สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักของอาคาร

ความกว้าง y ของพื้นที่ขอบของอาคาร มีขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้

ระยะ y = ค่าที่มากกว่าระหว่าง 6 เมตร และ $2z$ โดยที่

ระยะ z = ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10% ของความกว้างด้านที่แคบที่สุดของอาคาร และ 40% ของความสูง (แต่ต้องไม่น้อยกว่า 4% ของด้านที่แคบที่สุด และไม่น้อยกว่า 1 เมตร)

= ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง $\frac{10}{100} \times 60 = 6.0$ เมตร และ $\frac{40}{100} \times 6.0 = 2.4$ เมตร

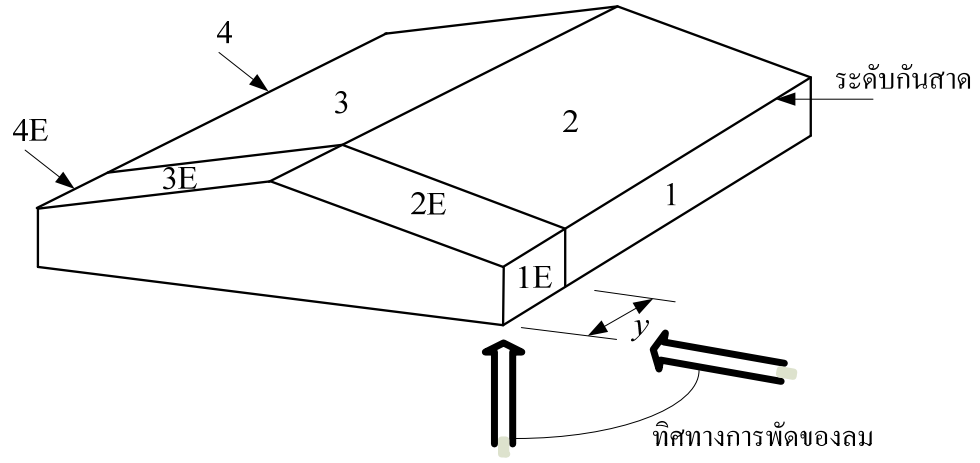
$\therefore z$ = 2.4 เมตร (ซึ่งเท่ากับ $\frac{4}{100} \times 60 = 2.4$ เมตร และไม่น้อยกว่า 1 เมตร)

ระยะ y = ค่าที่มากกว่าระหว่าง 6 เมตร และ $2z$

= ค่าที่มากกว่าระหว่าง 6 เมตร และ $2 \times 2.4 = 4.8$ เมตร

ดังนั้น y = 6 เมตร

กรณีที่ 1: ทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวตั้งฉากกับสันหลังคา



รูปที่ ต.1.2 การแบ่งโซนบนพื้นผิวกำแพงและหลังคาของอาคารตัวอย่าง สำหรับการคำนวณหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร เมื่อทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวตั้งฉากกับสันหลังคา

ค่าสัมประสิทธิ์ $C_g C_p$ สำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร สำหรับแรงลมกระทำตามกรณีที่ 1 (ทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวตั้งฉากกับสันหลังคา) สามารถเลือกใช้ได้จากตารางในรูป ข.1 ในมาตรฐานฯ ซึ่งเพื่อความสะดวกจึงได้นำมาสรุปไว้ในรูปที่ ต.1.2 และตารางที่ ต.1-1

ตารางที่ ต.1-1 ค่าสัมประสิทธิ์ $C_g C_p$ สำหรับแรงลมกระทำตามกรณีที่ 1

มุมของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร							
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E
0-5^o	0.75	1.15	-1.3	-2.0	-0.7	-1.0	-0.55	-0.8

ในกรณีของอาคารตัวอย่างนี้ เนื่องจากอัตราส่วน $B/H = 10$ ซึ่งมากกว่า 5 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นลบสำหรับพื้นผิว 2 และ 2E สามารถใช้ได้กับพื้นที่ที่กว้าง $2.5H$ ซึ่งเท่ากับ 15 เมตร จากขอบของอาคารด้านต้นลม สำหรับพื้นที่ส่วนที่เหลือบนพื้นผิว 2 และ 2E สามารถลดค่าลงโดยใช้ค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์สำหรับพื้นผิว 3 และ 3E ตามลำดับ

หน่วยแรงลมสุทธิ (p_{net}) เป็นการรวมกันแบบเวคเตอร์ระหว่างหน่วยแรงลมภายนอกอาคารและหน่วยแรงลมภายในอาคารตามสมการ $p_{net} = p + p_i$ โดยที่

$p = I_W q C_e C_g C_p$ คือค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร

$p_i = I_W q C_e C_{gi} C_{pi}$ คือค่าหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร ซึ่งมีทั้งค่าบวกและลบตามที่คำนวณไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

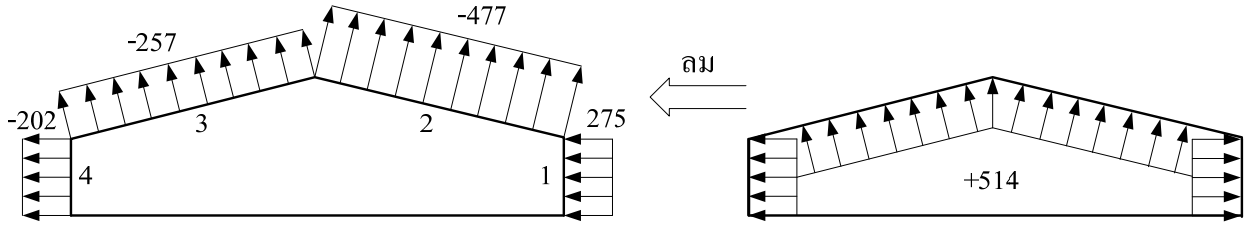
ในกรณีของอาคารตัวอย่าง ค่า p และ p_i มีค่าเท่ากับ

$p = I_w q C_e C_g C_p = 1 \times 390.6 \times 0.94 \times C_g C_p = 367.2 \times C_g C_p$ มีหน่วยเป็นนิวตัน/ม.^{2} เมื่อแทนค่า $C_g C_p$ ตามตาราง ต.1-1 แล้ว จะได้ค่าหน่วยแรงลมภายนอกอาคารที่กระทำในโซนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ ต.1-2

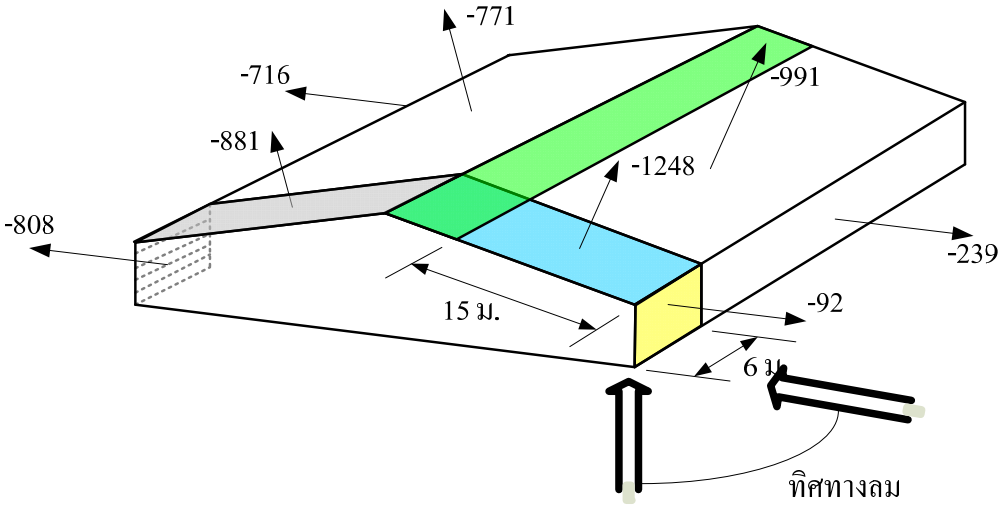
ตารางที่ ต.1-2 ค่าหน่วยแรงลมภายนอกและหน่วยแรงลมสุทธิ สำหรับกรณีที่ 1

พื้นผิวอาคาร (แบ่งตามโซน)	หน่วยแรงลมภายนอก (นิวตันต่อตารางเมตร)	หน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตันต่อตารางเมตร)	
		หน่วยแรงดันภายในเป็นบวก	หน่วยแรงดันภายในเป็นลบ
1	275	-239	789
1E	422	-92	936
2	-477	-991	37
2E	-734	-1248	-220
3	-257	-771	257
3E	-367	-881	147
4	-202	-716	312
4E	-294	-808	220

หมายเหตุ : ค่าหน่วยแรงลมภายในที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ ± 514.0 นิวตันต่อตารางเมตร



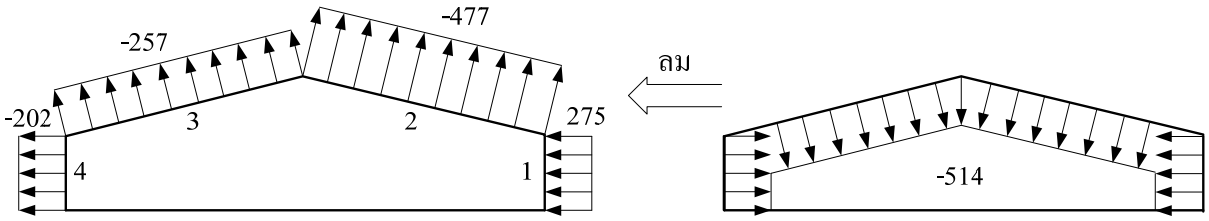
ก. หน่วยแรงลมภายนอก ข. หน่วยแรงลมภายในเป็นบวก



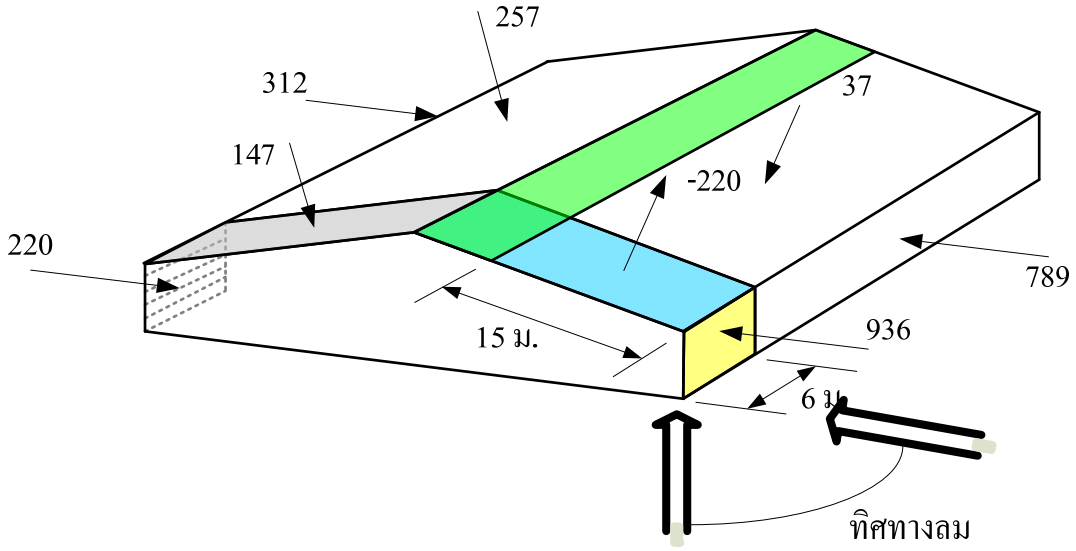
ค. หน่วยแรงลมสุทธิ

รูปที่ ต.1.3 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตัน/ม.^{2}) ที่กระทำกับพื้นผิวโซนต่างๆ ของอาคารตัวอย่าง เมื่อทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวตั้งฉากกับสันหลังคา และหน่วยแรงลมภายในมีค่าเป็นบวก

หมายเหตุ : แรงลมสุทธิมีทั้งค่าบวกและลบ ซึ่งหมายถึง หน่วยแรงลมที่กระทำตั้งฉากพุ่งเข้าหาพื้นผิวและพุ่งออกจากพื้นผิวอาคารตามลำดับ



ก. หน่วยแรงลมภายนอก ข. หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ



ค. หน่วยแรงลมสุทธิ

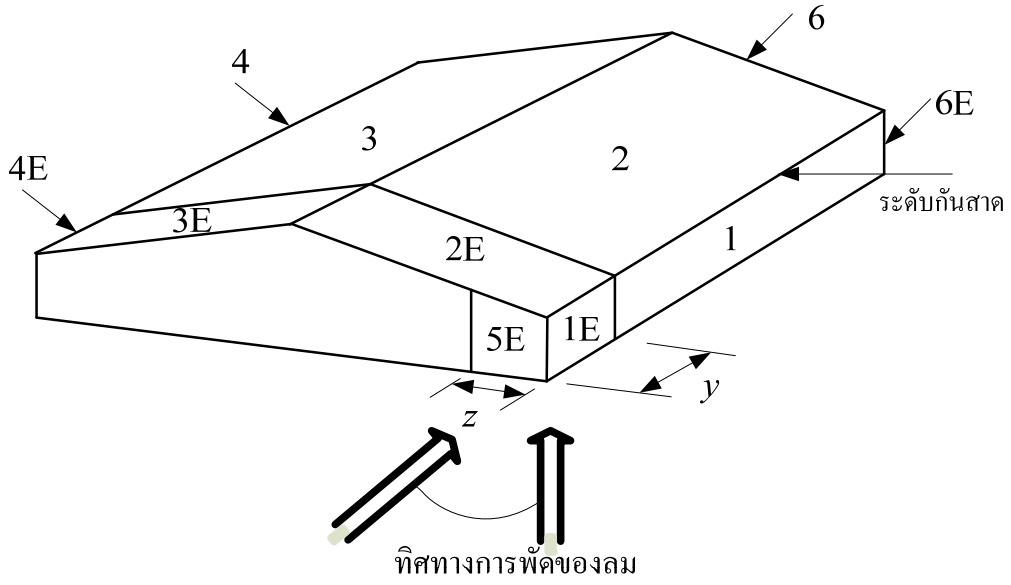
รูปที่ ต.1.4 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตัน/ม.^{2}) ที่กระทำกับพื้นผิวโซนต่างๆ ของอาคารตัวอย่าง เมื่อทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวตั้งฉากกับสันหลังคา และหน่วยแรงลมภายในมีค่าเป็นลบ

ค่าสัมประสิทธิ์ C_gC_p สำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร สำหรับแรงลมกระทำตามกรณีที่ 2 (ทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวขนานกับสันหลังคา) สามารถพิจารณาได้จากตารางในรูป ข.1 ในมาตรฐานฯ ซึ่งได้นำมาสรุปไว้ในรูปที่ ต.1.5 และตารางที่ ต.1-3 เพื่อความสะดวก

ตารางที่ ต.1-3 ค่าสัมประสิทธิ์ C_gC_p สำหรับแรงลมกระทำตามกรณีที่ 2

มุมของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร											
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E	5	5E	6	6E
0-90	-0.85	-0.9	-1.3	-2.0	-0.7	-1.0	-0.85	-0.9	0.75	1.15	-0.55	-0.8

<u>กรณีที่ 2</u>: ทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวขนานกับสันหลังคา



รูปที่ ต.1.5 การแบ่งโซนบนพื้นผิวกำแพงและหลังคาของอาคารตัวอย่าง สำหรับการคำนวณหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร เมื่อทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวขนานกับสันหลังคา

เช่นเดียวกันกับแรงลมกระทำกรณีที่ 1 ที่ได้คำนวณไปแล้วนั้น หน่วยแรงลมสุทธิสำหรับแรงลมกระทำกรณีที่ 2 สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ $p_{net} = p + p_i$

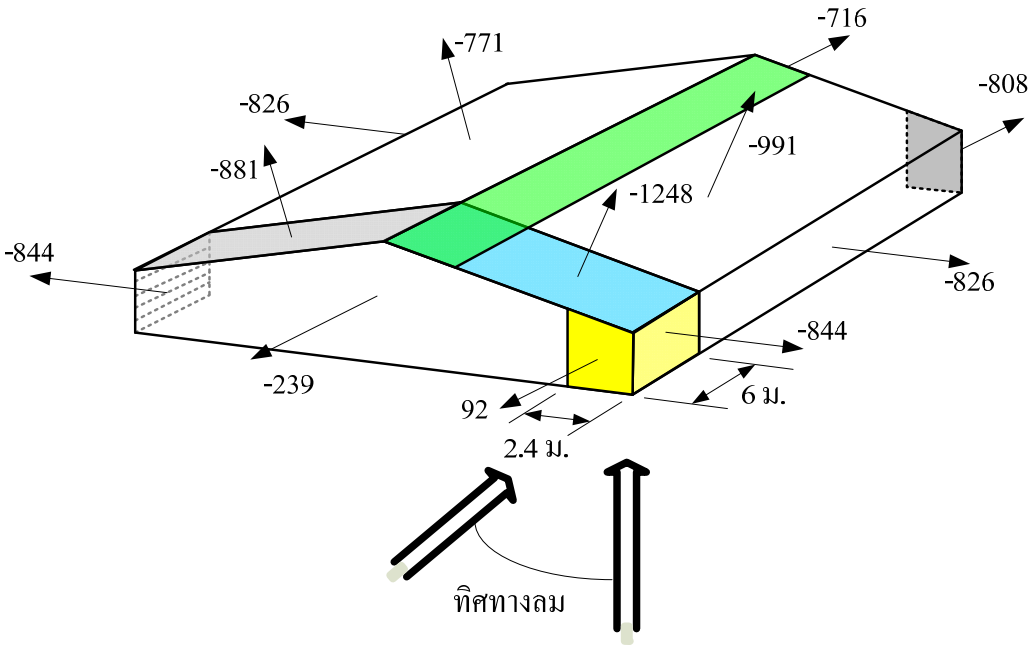
ซึ่งในกรณีของอาคารตัวอย่างนี้

$p = I_w q C_e C_g C_p = 1 \times 390.6 \times 0.94 \times C_g C_p = 367.2 \times C_g C_p$ มีหน่วยเป็นนิวตัน/ม.^{2} เมื่อแทนค่า $C_g C_p$ ตามตารางที่ ต.1-3 แล้ว จะได้ค่าหน่วยแรงลมภายนอกอาคารที่กระทำในโซนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ ต.1-4

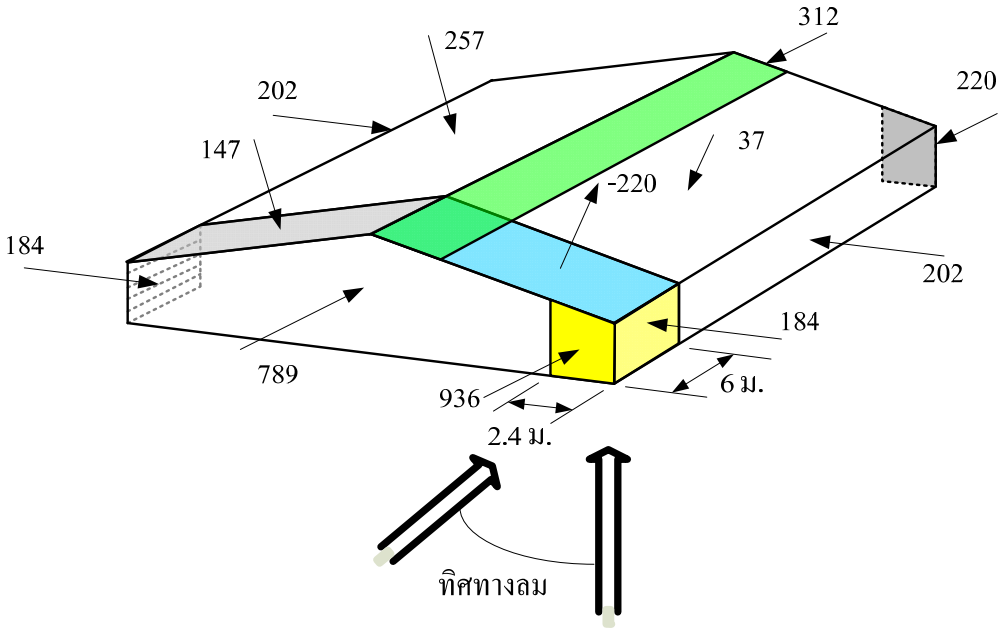
ตารางที่ ต.1-4 ค่าหน่วยแรงลมภายนอกและหน่วยแรงลมสุทธิ สำหรับกรณีที่ 2

พื้นผิวอาคาร (แบ่งตามโซน)	หน่วยแรงลมภายนอก (นิวตันต่อตารางเมตร)	หน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตันต่อตารางเมตร)	
		หน่วยแรงลมภายในเป็นบวก	หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ
1	-312	-826	202
1E	-330	-844	184
2	-477	-991	37
2E	-734	-1248	-220
3	-257	-771	257
3E	-367	-881	147
4	-312	-826	202
4E	-330	-844	184
5	275	-239	789
5E	422	-92	936
6	-202	-716	312
6E	-294	-808	220

หมายเหตุ : ค่าหน่วยแรงลมภายในที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ ± 514.0 นิวตันต่อตารางเมตร



รูปที่ ต.1.6 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตัน/ม.^{2}) ที่กระทำกับพื้นผิวโซนต่างๆ ของอาคารตัวอย่าง เมื่อทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวขนานกับสันหลังคา และหน่วยแรงลมภายในมีค่าเป็นบวก



รูปที่ ต.1.7 ค่าหน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตัน/ม.^{2}) ที่กระทำกับพื้นผิวโซนต่างๆ ของอาคารตัวอย่าง เมื่อทิศทางลมโดยทั่วไปอยู่ในแนวขนานกับสันหลังคา และหน่วยแรงลมภายในมีค่าเป็นลบ

4.2 การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบผนังอาคาร หลังคา และชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง

- การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของผนังและหลังคา จะต้องเลือกค่าสัมประสิทธิ์ C_pC_g ที่เหมาะสมมาใช้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวแปรผันกับพื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area) ดังนั้นในเบื้องต้นต้องทำการคำนวณหาพื้นที่รับลมสำหรับองค์อาคารประเภทต่างๆ เสียก่อน

  สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของผนัง ซึ่งได้แก่
  โครงคร่าวผนัง
  พื้นที่รับลมของโครงเคร่าผนัง = 7.5 เมตร x 2 เมตร = 15 ตารางเมตร

  แผ่นเหล็กมุงผนัง
  พื้นที่รับลมของแผ่นเหล็กมุงผนัง = 2 เมตร x 0.6 เมตร = 1.2 ตารางเมตร

  ตัวยึดแผ่นเหล็กมุงผนังบนโครงเคร่า
  พื้นที่รับลมของตัวยึดแผ่นเหล็กมุงผนังบนโครงเคร่า = 2 เมตร x 0.3 เมตร
  = 0.6 ตารางเมตร

  จากรูป ข. 2 ในมาตรฐานฯ จะได้ว่า ค่า C_pC_g สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของผนังแสดงไว้ในรูปของกราฟ ซึ่งแปรผันตามพื้นที่รับลม และเมื่อพิจารณาพื้นที่รับลมตามที่คำนวณไว้ข้างต้นแล้ว จะได้ค่า C_pC_g ดังแสดงในตารางที่ ต.1-5

ตารางที่ ต.1-5 ค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับการคำนวณแรงลมเพื่อออกแบบโครงสร้างของผนังอาคาร

ชิ้นส่วนโครงสร้างรอง	$C_pC_g^*$			
	Zone e		Zone w	
โครงเคร่าผนัง (Girt)	+1.45	-1.70	+1.45	-1.60
แผ่นเหล็กมุงผนัง (Wall panel)	+1.73	-2.07	+1.73	-1.77
ตัวยึดแผ่นเหล็กมุงผนังบนโคร่งเคร่า (Wall panel fastener)	+1.75	-2.10	+1.75	-1.80

* ค่าสัมประสิทธิ์ C_pC_g ดังกล่าวเป็นค่าโดยประมาณจากกราฟ

ค่าแรงลมสุทธิ สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของผนัง สามารถคำนวณได้จากสมการ $p_{net} = p + p_i$

สำหรับการคำนวณแรงลมที่กระทำกับโครงเคร่าผนังที่อยู่ในโซน e จะได้ค่าหน่วยแรงลมภายนอกอาคารมีค่าเท่ากับ

$p = I_w q C_e C_g C_p = 1 \times 390.6 \times 0.94 \times 1.45 = 532$ นิวตัน/ม.^{2} และ

$p = I_w q C_e C_g C_p = 1 \times 390.6 \times 0.94 \times (-1.70) = -624$ นิวตัน/ม.^{2}

ส่วนค่าแรงลมภายในอาคารมีค่าเท่ากับ $p_i = I_w q C_e C_{gi} C_{pi} = \pm 514.0$ นิวตัน/ม.^{2}

เมื่อพิจารณาผลรวมแบบเวคเตอร์ของหน่วยแรงลมภายนอกและภายในอาคารแล้ว จะพบว่า

ค่าหน่วยแรงลมที่เป็นบวกมีค่ามากที่สุดเท่ากับ $532 + 514 = 1046$ นิวตัน/ม.^{2}

ค่าหน่วยแรงลมที่เป็นลบมีค่ามากที่สุดเท่ากับ $-624 - 514 = -1138$ นิวตัน/ม.^{2} ซึ่งเป็นค่าที่จะนำมาใช้เพื่อการออกแบบต่อไป

จากแนวทางการคำนวณตามตัวอย่างการคำนวณข้างต้น สามารถหาค่าหน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของผนัง ประเภทอื่นได้ดังสรุปไว้ในตารางที่ ต.1-6

ตารางที่ ต.1-6 หน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบโครงสร้างผนังอาคาร

ชิ้นส่วนโครงสร้างรอง	หน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตันต่อตารางเมตร)			
	Zone e		Zone w	
โครงเคร่าผนัง (Girt)	+1046	-1138	+1046	-1011
แผ่นเหล็กมุงผนัง (Wall panel)	+1148	-1273	+1148	-1163
ตัวยึดแผ่นเหล็กมุงผนังบนโคร่งเคร่า (Wall panel fastener)	+1156	-1284	+1156	-1174

- การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของหลังคา ผู้ออกแบบจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ C_pC_g ที่เหมาะสมเช่นเดียวกันกับกรณีของผนังอาคาร เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แปรผันกับพื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (design tributary area) ดังนั้นในเบื้องต้นต้องทำการคำนวณหาพื้นที่รับลมสำหรับองค์อาคารประเภทต่างๆ เสียก่อน

  สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของหลังคา ซึ่งได้แก่

  แป
  พื้นที่รับลมของแป = 7.5 เมตร x 1.5 เมตร = 11.25 ตารางเมตร

  แผ่นเหล็กมุงหลังคา
  พื้นที่รับลมของแผ่นเหล็กมุงหลังคา = 1.5 เมตร x 0.6 เมตร = 0.9 ตารางเมตร

  ตัวยึดแผ่นเหล็กมุงหลังคาบนแป
  พื้นที่รับลมของตัวยึดแผ่นเหล็กมุงหลังคาบนแป = 1.5 เมตร x 0.3 เมตร
  = 0.45 ตารางเมตร

  จากรูปข. 3 ในมาตรฐานฯ จะได้ว่า ค่า C_pC_g สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของหลังคาแสดงไว้ในรูปของกราฟ ซึ่งแปรผันตามพื้นที่รับลม และเมื่อพิจารณาพื้นที่รับลมตามที่คำนวณไว้ข้างต้นแล้ว จะได้ค่า C_pC_g ดังแสดงในตารางที่ ต.1-7

ตารางที่ ต.1-7 ค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับการคำนวณแรงลมเพื่อออกแบบโครงสร้างของผนังอาคาร

ชิ้นส่วนโครงสร้างรอง	C_pC_g					
	Zone s		Zone r		Zone c	
แป (Purlin)	+0.30	-2.00	+0.30	-1.50	+0.30	-2.00
แผ่นเหล็กมุงหลังคา (Roof panel)	+0.50	-2.50	+0.50	-1.85	+0.50	-5.38
ตัวยึดแผ่นเหล็กมุงหลังคาบนแป (Roof panel fastener)	+0.50	-2.50	+0.50	-1.85	+0.50	-5.38

* ค่าสัมประสิทธิ์ C_pC_g ดังกล่าวเป็นค่าโดยประมาณจากกราฟ

ค่าแรงลมสุทธิ สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของหลังคา สามารถคำนวณได้จากสมการ $p_{net} = p + p_i$

สำหรับการคำนวณแรงลมที่กระทำกับแปรของหลังคาที่อยู่ในโซน s จะได้ค่าหน่วยแรงลมภายนอกอาคารมีค่าเท่ากับ
$p = I_w q C_e C_g C_p = 1 \times 390.6 \times 0.94 \times 0.30 = 110$ นิวตัน/ม.^{2} และ
$p = I_w q C_e C_g C_p = 1 \times 390.6 \times 0.94 \times (-2.00) = -734$ นิวตัน/ม.^{2}
ส่วนค่าแรงลมภายในอาคารมีค่าเท่ากับ $p_i = I_w q C_e C_{gi} C_{pi} = \pm 514.0$ นิวตัน/ม.^{2}

เมื่อพิจารณาผลรวมแบบเวคเตอร์ของหน่วยแรงลมภายนอกและภายในอาคารแล้วจะพบว่า
ค่าหน่วยแรงลมที่เป็นบวกมีค่ามากที่สุดเท่ากับ $110 + 514 = 624$ นิวตัน/ม.^{2}
ค่าหน่วยแรงลมที่เป็นลบมีค่ามากที่สุดเท่ากับ $-734 - 514 = -1248$ นิวตัน/ม.^{2}
ซึ่งเป็นค่าที่จะนำมาใช้เพื่อการออกแบบต่อไป

จากแนวทางการคำนวณตามตัวอย่างการคำนวณข้างต้น สามารถหาค่าหน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรองของผนัง ประเภทอื่นได้ดังสรุปไว้ในตารางที่ ต.1-8

ตารางที่ ต.1-8 หน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบโครงสร้างหลังคาของอาคาร

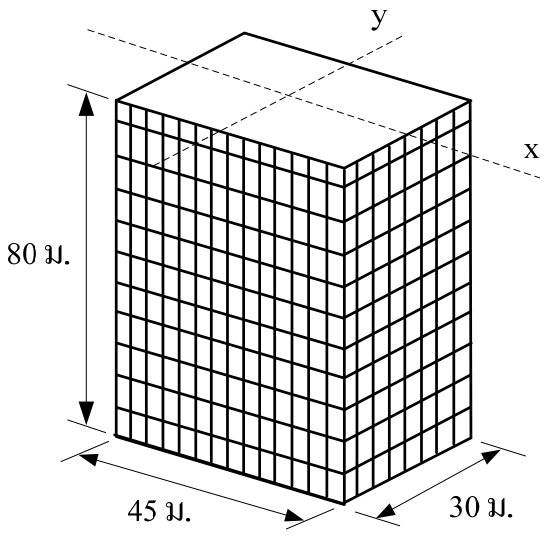
ชิ้นส่วนโครงสร้างรอง	หน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตันต่อตารางเมตร)					
	Zone s		Zone r		Zone c	
แป (Purlin)	+624	-1248	+624	-1034	+624	-1247
แผ่นเหล็กมุงหลังคา (Roof panel)	+697	-1431	+697	-1192	+697	-2488
ตัวยึดแผ่นเหล็กมุงหลังคาบนแป (Roof panel fastener)	+697	-1431	+697	-1192	+697	-2488

ตัวอย่างการคำนวณของอาคารสูงปานกลาง โดยวิธีการอย่างง่าย

ตัวอย่างที่ 2 ให้คำนวณหน่วยแรงลมสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักของอาคารพักอาศัยที่มีขนาด 30x45 เมตร และสูง 80 เมตร ในกรณีดังต่อไปนี้

ก. ความเร็วลมอ้างอิงตามที่กำหนดในมาตรฐานเท่ากับ 27 ม./วินาที และอาคารตั้งอยู่บริเวณสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง

ข. ให้ทำตารางหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักของอาคาร สำหรับความเร็วลมอ้างอิงตามที่กำหนดในมาตรฐานเท่ากับ 25, 27, 29 และ 30 ม./วินาที และสภาพภูมิประเทศแบบ A และ B



รูปที่ ต.2.1 ขนาดของอาคาร

วิธีทำ

การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม ของอาคารสูงไม่เกิน 80 เมตร และมีความสูงไม่เกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิผลที่น้อยที่สุด สามารถใช้วิธีการคำนวณอย่างง่ายในการออกแบบตามมาตรฐาน การคำนวณค่าหน่วยแรงลมโดยวิธีการอย่างง่าย เมื่อลมกระทำในทิศทาง xx และ yy จะให้ผลลัพธ์เหมือนกัน ในตัวอย่างนี้ จะแสดงเมื่อลมกระทำในทิศทาง yy

ก. ความเร็วลมอ้างอิงเท่ากับ 27 ม./วินาที และอาคารตั้งอยู่บริเวณสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง

พิจารณาลมกระทำในทิศทาง yy

ความเร็วลมอ้างอิง $(\overline{V})$ สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านกำลัง = 27 ม./วินาที

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม

$q = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^2$ = $\frac{1}{2}\times 1.25\times 27^2$ = 455.625 นิวตัน/ม.^{2}

สำหรับอาคารพักอาศัย อยู่ในประเภทความสำคัญปกติ ดังนั้น ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม $(I_w) = 1$

อาคารตั้งอยู่บริเวณสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง ดังนั้น ใช้ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) แบบ A

C_e ด้านต้นลม = $\left(\frac{z}{10}\right)^{0.2}$ = $0.63z^{0.2}$ ดังแสดงในตารางที่ ต.2-1

C_e ด้านท้ายลม = $\left(\frac{H/2}{10}\right)^{0.2}$ = $\left(\frac{40}{10}\right)^{0.2}$ = 1.32 (คิดที่ความสูง $H/2$)

ตารางที่ ต.2-1 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ความสูงจากพื้นดิน (เมตร)	ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)
0 – 10	1.00
10 – 20	1.15
20 – 30	1.25
30 – 40	1.32
40 – 60	1.43
60 – 80	1.52

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (C_g) สำหรับออกแบบโครงสร้างหลักโดยวิธีการอย่างง่าย = 2

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม

C_p ด้านต้นลม = 0.8

C_p ด้านท้ายลม = -0.5

หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคารด้านต้นลม

$p = I_w q C_e C_g C_p \quad = \quad 1 \times 455.625 \times 0.63 \times Z^{0.2} \times 2 \times 0.8$

$= 459.272\ Z^{0.2}$ ดังแสดงในตารางที่ ต.2-2 และรูปที่ ต.2.2

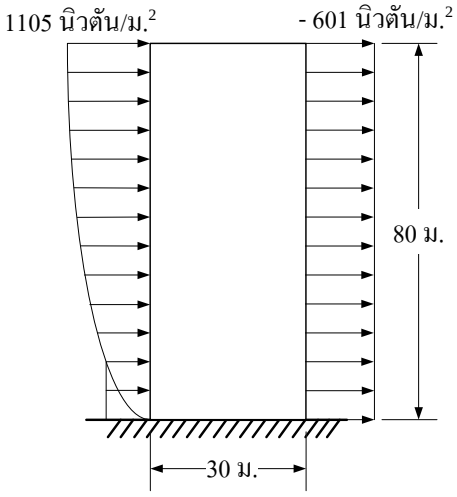
หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคารด้านท้ายลม

$p = I_w q C_e C_g C_p \quad = \quad 1 \times 455.625 \times 1.32 \times 2 \times (-0.5)$

$= -601.20$ นิวตัน/ม.^{2} ดังแสดงในตารางที่ ต.2-2 และรูปที่ ต.2.2

ตารางที่ ต.2-2 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า ด้านต้นลม ท้ายลม และรวมหน่วยแรงลม

ความสูงจากพื้นดิน (เมตร)	หน่วยแรงลมด้านต้นลม (นิวตัน/ม.^{2})	หน่วยแรงลมด้านท้ายลม (นิวตัน/ม.^{2})	รวมหน่วยแรงลมด้านต้นลมและท้ายลม (นิวตัน/ม.^{2})
0 – 10	729	- 601	1330
10 – 20	837	- 601	1439
20 – 30	908	- 601	1509
30 – 40	962	- 601	1563
40 – 60	1043	- 601	1644
60 – 80	1105	- 601	1706



รูปที่ ต.2.2 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าด้านต้นลมและท้ายลม

ข. ตารางหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า สำหรับออกแบบโครงสร้างหลักของอาคาร

ใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกับ ก. จะได้หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม สำหรับอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม และประเภทของอาคารที่มีความสำคัญปกติ แสดงในตารางที่ ต.2-3 ถึง ต.2-6 สำหรับความเร็วลมอ้างอิง ตามที่กำหนดในมาตรฐาน เท่ากับ 25, 27, 29 และ 30 ม./วินาที ตามลำดับ

ตารางที่ ต.2-3 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม สำหรับอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม สำหรับความเร็วลมอ้างอิง 25 ม./วินาที

ความสูงจากพื้นดิน, เมตร	หน่วยแรงลม, นิวตัน/ม.^{2} (กก./ม.^{2})
	สภาพภูมิประเทศแบบ A
0 - 10	1140 (115)
10 - 20	1235 (125)
20 - 40	1340 (135)
40 - 60	1410 (145)
60 - 80	1465 (150)

ตารางที่ ต.2-4 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม สำหรับอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม สำหรับความเร็วลมอ้างอิง 27 ม./วินาที

ความสูงจากพื้นดิน, เมตร	หน่วยแรงลม, นิวตัน/ม.^{2} (กก./ม.^{2})	
	สภาพภูมิประเทศแบบ A	สภาพภูมิประเทศแบบ B
0 - 10	1330 (135)	965 (100)
10 - 20	1440 (145)	1055 (110)
20 - 40	1565 (160)	1190 (120)
40 - 60	1645 (170)	1285 (130)
60 - 80	1705 (175)	1360 (140)

ตารางที่ ต.2-5 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม สำหรับอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม สำหรับความเร็วลมอ้างอิง 29 ม./วินาที

ความสูงจากพื้นดิน, เมตร	หน่วยแรงลม, นิวตัน/ม.^{2} (กก./ม.^{2})	
	สภาพภูมิประเทศแบบ A	สภาพภูมิประเทศแบบ B
0 - 10	1535 (155)	1115 (115)
10 - 20	1660 (170)	1215 (125)
20 - 40	1805 (185)	1375 (140)
40 - 60	1900 (195)	1480 (150)
60 - 80	1970 (200)	1570 (160)

ตารางที่ ต.2-6 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม สำหรับอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม สำหรับความเร็วลมอ้างอิง 30 ม./วินาที

ความสูงจากพื้นดิน, เมตร	หน่วยแรงลม, นิวตัน/ม.^{2} (กก./ม.^{2})	
	สภาพภูมิประเทศแบบ A	สภาพภูมิประเทศแบบ B
0 - 10	1640 (165)	1195 (120)
10 - 20	1775 (180)	1300 (135)
20 - 40	1930 (195)	1470 (150)
40 - 60	2030 (205)	1585 (160)
60 - 80	2105 (215)	1680 (170)

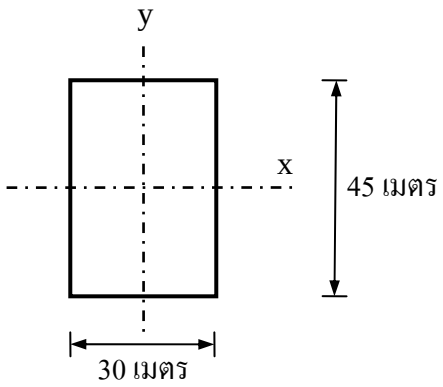
หมายเหตุ

1. หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าได้รวมหน่วยแรงลมด้านต้นลม และท้ายลมมากระทำที่ด้านต้นลม
2. สามารถนำตารางที่ ต.2-3 ถึง ต.2-6 มาใช้สำหรับออกแบบหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าสำหรับอาคารสูงปานกลางที่มีความสูงไม่เกิน 80 ม. และมีความสูงไม่เกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิผลที่น้อยที่สุดได้ โดยให้ค่าที่ปลอดภัย เนื่องจากแรงลมด้านท้ายลมคิดที่ความสูง 80/2 = 40 ม. ทั้งนี้ อาคารดังกล่าว ต้องมีความสูงมากกว่าความกว้าง ตามรูปที่ ข.9 ในมาตรฐาน
3. ในกรณีที่ประเภทความสำคัญของอาคารแตกต่างไปจากที่กำหนด ให้ใช้ค่าประกอบความสำคัญของแรงลมไปคูณค่าที่ได้จากตารางที่ ต.2-3 ถึง ต.2-6

ตัวอย่างการคำนวณของอาคารสูง

ตัวอย่างที่ 3 ให้คำนวณแรงลมเพื่อการออกแบบและผลตอบสนอง สำหรับอาคารที่มีขนาด 30×45 เมตร สูง 180 เมตร ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง (แบบ B) โดยมีความเร็วลมอ้างอิง (เป็นค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่ง สำหรับคาบเวลากลับ 50 ปี) เท่ากับ 25 เมตร/วินาที และมีคุณสมบัติของอาคารดังต่อไปนี้

- ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทาง yy = 0.25 รอบ/วินาที
- ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทาง xx = 0.20 รอบ/วินาที
- ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางบิด = 0.30 รอบ/วินาที
- อัตราส่วนความหน่วงสำหรับในแต่ละทิศทาง $(\beta_D, \beta_W, \beta_T)$ มีค่าเท่ากับ 0.015
- ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (ρ_B) = 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ ต.3.1 แปลนอาคาร

วิธีทำ

เนื่องจากอาคารเป็นอาคารสูง เกิน 80 เมตรตามหัวข้อ 3.1 (ก) จึงต้องใช้การคำนวณแรงลมและการตอบสนองในทิศทางลมโดยวิธีการอย่างละเอียดในบทที่ 3 และเนื่องจากอาคารมีค่า อัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}} = \frac{180}{\sqrt{30 \times 45}} = 4.9$ และ $D/W = 45/30 = 1.5$ (หรือ $D/W = 30/45 = 0.667$ เมื่อพิจารณาลมในอีกทิศทาง) ตามหัวข้อ 4.1 (ก) และ (ข) จึงใช้การคำนวณแรงลมและการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิดโดยวิธีการในบทที่ 4

อาคารนี้จัดอยู่ในประเภทอาคารที่มีความสำคัญปกติ ดังนั้น ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม (I_w) สำหรับสภาวะจำกัดด้านกำลัง (การคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบ) ใช้เท่ากับ 1.0 และสำหรับสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน (การคำนวณการตอบสนองของอาคาร) ใช้เท่ากับ 0.75

อาคารมีรูปตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นจึงพิจารณากรณีที่ลมกระทำในทิศทาง xx และ yy เพื่อคำนวณแรงลมและผลตอบสนองในทิศทางลมและในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และคำนวณโมเมนต์บิด

ก. ลมกระทำในทิศทาง yy

ความกว้างของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับลม $(W) = 30$ เมตร

ความลึกของอาคารในทิศทางขนานกับลม $(D) = 45$ เมตร

ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางลม (n_D)

= 0.25 รอบ/วินาที

ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (n_W)

= 0.20 รอบ/วินาที

ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางบิด (n_T)

= 0.30 รอบ/วินาที

<u>ก.1 แรงลมและการตอบสนองในทิศทางลม</u>

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้

- ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่ระดับยอดอาคาร (C_{eH}) (จากสมการที่ 3-2)

$$C_{eH} = 0.5\left(\frac{z}{12.7}\right)^{0.5} = 0.5\left(\frac{180}{12.7}\right)^{0.5} = 1.88$$

- ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับยอดอาคาร (V_H)

$$V_H = \bar{V}\sqrt{C_{eH}} = 25\sqrt{1.88} = 34.30 \text{ เมตร/วินาที}$$

- อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของอาคาร $(W/H) = 30/180 = 0.167$
- จำนวนคลื่นต่อเมตร (เพื่อใช้คำนวณค่า F) $(n_D/V_H) = 0.0073$
- ความถี่ธรรมชาติลดรูป (เพื่อใช้คำนวณค่า s) $(n_D H/V_H) = 1.312$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าอัตราส่วน σ/μ

- ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ (K)

  $= 0.10$ สำหรับภูมิประเทศแบบ B

- ค่าประกอบการตอบสนองแบบกึ่งสถิตต่อการแปรปรวนของลม (B)หาค่าได้จากรูปที่ 3.1 หรือจากสมการ (3-6) $= 0.62$

- ตัวคูณลดเนื่องจากขนาดของอาคาร (s) หาค่าได้จากรูปที่ 3.2 หรือจากสมการ (3-7) $= 0.073$

- อัตราส่วนพลังงานของการแปรปรวนของลม ณ ความถี่ธรรมชาติของอาคาร (F) หาค่าได้จากรูปที่ 3.3 หรือ จากสมการ (3-8) $= 0.23$

- อัตราส่วนความหน่วง $(\beta_D) = 0.015$

จากสมการ (3-5)

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}}(B + \frac{sF}{\beta_D})}$$

$$= \sqrt{\frac{0.10}{1.88}\left(0.62 + \frac{0.073 \times 0.23}{0.015}\right)}$$

$$= 0.304$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าความถี่เฉลี่ยของการตอบสนองของโครงสร้าง (v)

จากสมการ(3-11)

$$v = n_D \sqrt{\frac{sF}{sF + \beta_D B}}$$

$$= 0.25\sqrt{\frac{0.073 \times 0.23}{0.073 \times 0.23 + 0.015 \times 0.62}}$$

$$= 0.200 \text{ รอบต่อวินาที}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับแก้ค่ารากกำลังสองให้เป็นค่าสูงสุด (g_P) หาค่าได้จากรูปที่ 3.4 หรือจากสมการ (3-9) $= 3.79$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (C_g) จากสมการ (3-4)

$$\begin{aligned} C_g &= 1 + g_p(\sigma/\mu) \\ &= 1 + 3.79(0.304) \\ &= 2.15 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคาร

- หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q) หาค่าได้จากสมการที่ (2-4)

$$q = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 25^2 = 390.6 \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

- ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

  C_e ด้านต้นลม ตามความสูงจากพื้น z

  $$C_e(z) = 0.5(z/12.7)^{0.5} = 0.14z^{0.5}$$

  (โดยค่า $C_e(z)$ มีค่าในช่วง $0.5 \le C_e(z) \le 2.5$)

  C_e ด้านท้ายลม (มีค่าคงที่และคิดที่ความสูง $H/2 = 90$ เมตร)

  $$C_e = 0.5(90/12.7)^{0.5} = 1.33$$

- ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (C_p)

  C_p ด้านต้นลม $= +0.8$ (แรงดัน มีทิศเข้าหาพื้นผิว ดูรูปที่ ข.9)

  C_p ด้านท้ายลม $= -0.5$ (แรงดูด มีทิศพุ่งออกจากพื้นผิว ดูรูปที่ ข.9)

- หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคาร (p) หาค่าได้จากสมการที่ (2-2)

  ด้านต้นลม $p = I_w q C_e C_g C_p$

  $$= 1.0 \times 390.6 \times 0.14z^{0.5} \times 2.15 \times 0.8$$

  $$= 94.1 \times z^{0.5} \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

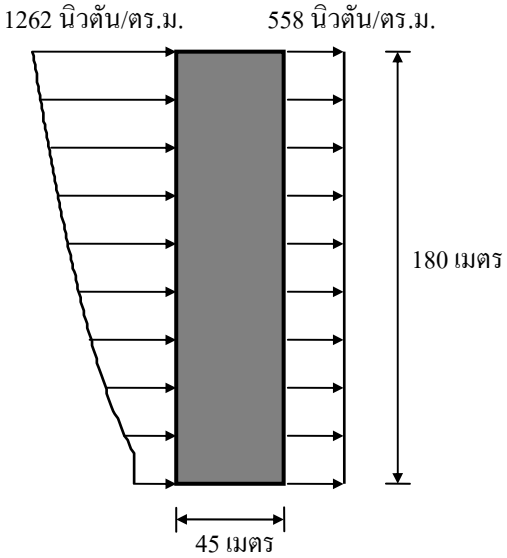
หน่วยแรงลมด้านต้นลมที่ยอดอาคาร (H)

$$p(H) = 94.1 \times 180^{0.5} = 1262 \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

ด้านท้ายลม p $= I_w q C_e C_g C_p$

$$= 1.0 \times 390.6 \times 1.33 \times 2.15 \times (-0.5)$$

$$= -558 \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$



รูปที่ ต.3.2 แรงลมสถิตเทียบเท่าด้านต้นลมและท้ายลม เมื่อลมกระทำในทิศทาง yy

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณการโก่งตัวด้านข้างสูงสุดในทิศทางแนวราบ ณ ยอดอาคาร (Δ) หาค่าได้จากสมการที่ (3-12) ใช้สัมประสิทธิ์ I_w เท่ากับ 0.75 ใช้สัมประสิทธิ์ α สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ B เท่ากับ 0.5 และใช้สัมประสิทธิ์ C_p ที่เป็นผลรวมของแรงลมด้านหน้าและด้านหลังของอาคารเท่ากับ 0.8+(-0.5)=1.3

$$\Delta = \frac{3\left(\frac{H^2}{2+\alpha}\right) I_w q C_{eH} C_g C_p}{4\pi^2 n_D^2 D \rho_B H^2}$$

$$= \frac{3\left(\frac{180^2}{2+0.5}\right) \times 0.75 \times 390.6 \times 1.88 \times 2.15 \times 1.3}{4\pi^2 \times 0.25^2 \times 45 \times 200 \times 180^2}$$

$$= 0.0832 \text{ เมตร}$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศทางลม (a_D) หาค่าได้จากสมการที่ (3-13)

$$a_D = 4\pi^2 n_D^2 g_p \sqrt{\frac{KsF}{C_{eH}\beta_D}} \cdot \frac{\Delta}{C_g}$$

$$= 4\pi^2 \times 0.25^2 \times 3.79 \times \sqrt{\frac{0.10 \times 0.073 \times 0.23}{1.88 \times 0.015}} \times \frac{0.0832}{2.15}$$

$$= 0.0883 \text{ เมตร/วินาที}^2$$

<u>ก.2 แรงลมและการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม</u>

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้

- อัตราส่วน $D/W = 45/30 = 1.5$
- ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับยอดอาคาร (V_H)

  $V_H = \overline{V}\sqrt{C_{eH}} = 25\sqrt{1.88} = 34.30$ เมตร/วินาที
- อัตราส่วน $\frac{V_H}{n_W\sqrt{WD}} = \frac{34.3}{0.20 \times \sqrt{30 \times 45}} = 4.67 < 10$ ใช้การคำนวณในบทที่ 4
- หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลมที่ระดับความสูงยอดอาคาร (q_H) หาค่าได้จากสมการที่ (4-2) $q_H = \frac{1}{2}\rho V_H^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 34.3^2 = 735.3$ นิวตัน/ตร.ม.

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม $\left(C_L^{'}\right)$ หาค่าได้จากรูปที่ 4.1 หรือสมการที่ (4-3)

$$C_L^{'} = 0.0082(D/W)^3 - 0.071(D/W)^2 + 0.22(D/W)$$

$$= 0.0082(1.5)^3 - 0.071(1.5)^2 + 0.22(1.5)$$

$$= 0.198$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม หาค่าได้จากสมการที่ (4-4)

$$g_L = \sqrt{2\log_e(3600 n_W)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600 n_W)}}$$

$$= \sqrt{2\log_e(3600 \times 0.20)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600 \times 0.20)}}$$

$$= 3.79$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าสเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม (F_L)

สำหรับ $D/W = 1.5$ และ $\frac{n_W\sqrt{WD}}{V_H} = \frac{0.20 \times \sqrt{30 \times 45}}{34.3} = 0.21$ ค่า F_L หาได้จากรูปที่ 4.3 หรือการคำนวณดังนี้

- สำหรับ $D/W = 1.5 < 3.0$ คำนวณ F_L จากสมการที่ (4-5) เพียงหนึ่งพจน์
- คำนวณ β_1

$$\beta_1 = \frac{(D/W)^4 + 2.3(D/W)^2}{2.4(D/W)^4 - 9.2(D/W)^3 + 18(D/W)^2 + 9.5(D/W) - 0.15} + \frac{0.12}{(D/W)}$$

$$= \frac{(1.5)^4 + 2.3(1.5)^2}{2.4(1.5)^4 - 9.2(1.5)^3 + 18(1.5)^2 + 9.5(1.5) - 0.15} + \frac{0.12}{(1.5)}$$

$$= 0.367$$

- คำนวณ λ_1

$$\lambda_1 = \frac{\left(1 + 0.38(D/W)^2\right)^{0.89}}{0.12}\frac{n_W W}{V_H}$$

$$= \frac{\left(1 + 0.38(1.5)^2\right)^{0.89}}{0.12}\frac{0.20 \times 30}{34.3}$$

$$= 2.526$$

- คำนวณ F_L สำหรับ $N = 1$ และ $\kappa_1 = 0.85$

$$F_L = \frac{4\kappa_1(1 + 0.6\beta_1)\beta_1}{\pi} \times \frac{\lambda_1^2}{\left(1 - \lambda_1^2\right)^2 + 4\beta_1^2\lambda_1^2}$$

$$= \frac{4 \times 0.85 \times (1 + 0.6 \times 0.367) \times 0.367}{\pi} \times \frac{2.526^2}{(1 - 2.526^2)^2 + 4 \times 0.367^2 \times 2.526^2}$$

$$= 0.0955$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม หาค่าได้จากสมการที่ (4-5)

$$R_L = \frac{\pi F_L}{4\beta_W} = \frac{\pi \times 0.0955}{4 \times 0.015} = 5.00$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม ที่ความสูง z จากพื้นดิน หาค่าได้จากสมการที่ (4-1)

$$P_L = 3 I_w q_H C_L' A \frac{z}{H} g_L \sqrt{1 + R_L}$$

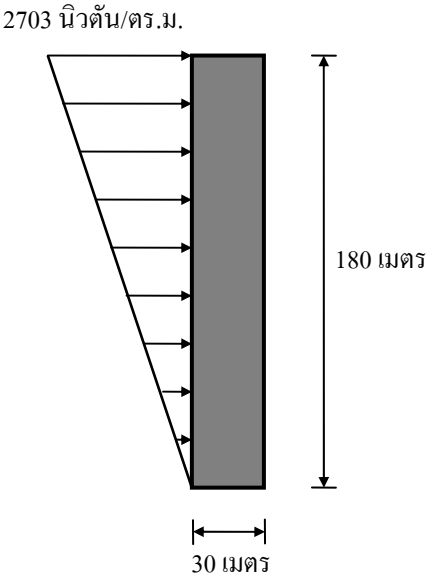
$$= 3 \times 1.0 \times 735.3 \times 0.198 \times (30 \times 1) \times \frac{z}{180} \times 3.79 \times \sqrt{1 + 5.00}$$

$$= 676 \times z \text{ นิวตัน ต่อความสูง 1 เมตร}$$

หรือพิจารณาเป็นหน่วยแรงลมที่กระทำต่อพื้นผิวด้านตั้งฉากกับทิศทางลม (ด้าน $D = 45$ เมตร)

$$p_L = \frac{676 \times z}{45} = 15.0 \times z \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

หน่วยแรงลมที่ยอดอาคาร (H) $p_L = 15.0 \times 180 = 2703$ นิวตัน/ตร.ม.



รูปที่ ต.3.3 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับแนวลม เมื่อลมกระทำในทิศทาง yy

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (a_w) ที่ยอดอาคาร $(z = H)$ หาค่าได้จากสมการที่ (4-11)

$$a_w = 3 I_w q_H C_L^{'} g_L \frac{W}{(\rho_B WD)} \frac{z}{H} \sqrt{R_L}$$

$$= 3 \times 0.75 \times 735.3 \times 0.198 \times 3.79 \times \frac{30}{200 \times 30 \times 45} \times \frac{180}{180} \times \sqrt{5.00}$$

$$= 0.308 \text{ เมตร/วินาที}^2$$

สำหรับในกรณีนี้ การคำนวณอัตราเร่งสูงสุดสามารถใช้ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 10 ปี สำหรับคำนวณตัวแปรในสมการสำหรับ a_w ได้โดยตรง และไม่ต้องใช้ค่า I_w ในสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน โดยที่ ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 10 ปี คำนวณได้โดยใช้ค่าประกอบจากตารางที่ อ.2-1 ดังนี้

$$V_{10} = 0.81 \times 25 = 20.25 \text{ เมตร/วินาที}$$

จากนั้น ทำการคำนวณตัวแปรสำหรับการคำนวณ a_w โดยใช้ค่าความเร็วลมเท่ากับ 20.25 เมตร/วินาที ทำให้ได้ค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงเป็นคือ $q_H = 482.4$ นิวตัน/ตร.ม. และ $R_L = 3.03$ จากนั้น ค่า a_w สามารถคำนวณได้ใหม่คือ (ควรสังเกตว่า ไม่ต้องใช้ I_w ในการคำนวณ)

$$a_w = 3 \times 482.4 \times 0.198 \times 3.79 \times \frac{30}{200 \times 30 \times 45} \times \frac{180}{180} \times \sqrt{3.03} = 0.210 \text{ เมตร/วินาที}^2$$

ก.3 โมเมนต์บิด

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้

- อัตราส่วน $\frac{V_H}{n_T\sqrt{WD}} = \frac{34.3}{0.30\times\sqrt{30\times 45}} = 3.11 < 10$ ใช้การคำนวณในบทที่ 4

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์บิด $\left(C_T^{'}\right)$ หาค่าได้จากรูปที่ 4.5 หรือสมการที่ (4-13)

$$C_T^{'} = \left\{0.0066 + 0.015\left(D/W\right)^2\right\}^{0.78}$$

$$= \left\{0.0066 + 0.015\left(1.5\right)^2\right\}^{0.78} = 0.0818$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในแนวบิด หาค่าได้จากสมการที่ (4-14)

$$g_T = \sqrt{2\log_e(3600 n_T)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600 n_T)}}$$

$$= \sqrt{2\log_e(3600\times 0.30)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600\times 0.30)}}$$

$$= 3.89$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าสเปกตรัมของแรงลมในแนวบิดของอาคาร $\left(F_T\right)$

สำหรับ $D/W = 1.5$ และ $\frac{n_T\sqrt{WD}}{V_H} = \frac{0.30\times\sqrt{30\times 45}}{34.3} = 0.32$ ค่า F_T หาได้จากรูปที่ 4.7 หรือการคำนวณดังนี้

- คำนวณ $V_T^* = \frac{V_H}{n_T\sqrt{WD}} = 3.11$

- สำหรับ $V_T^* \le 4.5$ จากสมการ (4-18) และ (4-19)

$$K_T = \frac{-1.1\left(D/W\right) + 0.97}{\left(D/W\right)^2 + 0.85\left(D/W\right) + 3.3} + 0.17$$

$$= \frac{-1.1(1.5)+0.97}{(1.5)^2+0.85(1.5)+3.3}+0.17 = 0.0704$$

$$\lambda_T = \frac{(D/W)+3.6}{(D/W)^2-5.1(D/W)+9.1}+\frac{0.14}{(D/W)}+0.14$$

$$= \frac{(1.5)+3.6}{(1.5)^2-5.1(1.5)+9.1}+\frac{0.14}{(1.5)}+0.14 = 1.612$$

- คำนวณ F_T จากสมการ (4-16) โดยที่ $L = 45$ เมตร

$$F_T = \frac{0.14K_T^2\left(V_T^*\right)^{2\lambda_T}}{\pi}\frac{D\left(W^2+D^2\right)^2}{L^2W^3}$$

$$= \frac{0.14\times(0.0704)^2\times(3.11)^{2\times1.612}}{\pi}\times\frac{45\times\left(30^2+45^2\right)^2}{45^2\times30^3}$$

$$= 0.0603$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลมในแนวบิดของอาคาร (R_T) หาค่าได้จากสมการที่ (4-15)

$$R_T = \frac{\pi F_T}{4\beta_T}$$

$$= \frac{\pi\times0.0603}{4\times0.015} = 3.16$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าเนื่องจากลมที่กระทำกับอาคาร ที่ความสูง z จากพื้นดิน หาค่าได้จากสมการที่ (4-12)

$$M_T = 1.8I_w q_H C_T' AW\frac{z}{H}g_T\sqrt{1+R_T}$$

$$= 1.8\times1.0\times735.3\times0.0818\times(30\times1)\times30\times\frac{z}{180}\times3.89\times\sqrt{1+3.16}$$

$$= 4295\times z \text{ นิวตัน-เมตร ต่อความสูง 1 เมตร}$$

จากนั้นนำแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิด ไปรวมผลในลักษณะตามหัวข้อ 4.5

ข. ลมกระทำในทิศทาง xx

ความกว้างของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับลม $(W) = 45$ เมตร

ความลึกของอาคารในทิศทางขนานกับลม $(D) = 30$ เมตร

ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางลม (n_D)

= 0.20 รอบ/วินาที

ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (n_W)

= 0.25 รอบ/วินาที

ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทางบิด (n_T)

= 0.30 รอบ/วินาที

<u>ข.1 แรงลมและการตอบสนองในทิศทางลม</u>

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้

- ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่ระดับยอดอาคาร (C_{eH}) (จากสมการที่ 3-2)

$$C_{eH} = 0.5\left(\frac{z}{12.7}\right)^{0.5} = 0.5\left(\frac{180}{12.7}\right)^{0.5} = 1.88$$

- ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับยอดอาคาร (V_H)

$$V_H = \overline{V}\sqrt{C_{eH}} = 25\sqrt{1.88} = 34.3 \text{ เมตร/วินาที}$$

- อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของอาคาร $(W/H) = 45/180 = 0.25$

- จำนวนคลื่นต่อเมตร (เพื่อใช้คำนวณค่า F) $(n_D/V_H) = 0.0058$

- ความถี่ธรรมชาติลดรูป (เพื่อใช้คำนวณค่า s) $(n_D H/V_H) = 1.049$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าอัตราส่วน σ/μ

- ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ (K)

  $= 0.10$ สำหรับภูมิประเทศแบบ B

- ค่าประกอบการตอบสนองแบบกึ่งสถิตต่อการแปรปรวนของลม (B) หาค่าได้จากรูปที่ 3.1 หรือจากสมการ (3-6) $= 0.56$

- ตัวคูณลดเนื่องจากขนาดของอาคาร (s) หาค่าได้จากรูปที่ 3.2 หรือจากสมการ (3-7) $= 0.076$

- อัตราส่วนพลังงานของการแปรปรวนของลม ณ ความถี่ธรรมชาติของอาคาร (F) หาค่าได้จากรูปที่ 3.3 หรือ จากสมการ (3-8) $= 0.263$

- อัตราส่วนความหน่วง $(\beta_D) = 0.015$

จากสมการ (3-5)

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}}(B + \frac{sF}{\beta_D})}$$

$$= \sqrt{\frac{0.10}{1.88}\left(0.56 + \frac{0.076 \times 0.263}{0.015}\right)}$$

$$= 0.317$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าความถี่เฉลี่ยของการตอบสนองของโครงสร้าง (v)

จากสมการ(3-11)

$$v = n_D \sqrt{\frac{sF}{sF + \beta_D B}}$$

$$= 0.20\sqrt{\frac{0.076 \times 0.263}{0.076 \times 0.26 + 0.015 \times 0.56}}$$

$$= 0.168 \text{ รอบต่อวินาที}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับแก้ค่ารากกำลังสองให้เป็นค่าสูงสุด (g_P) หาค่าได้จากรูปที่ 3.4 หรือจากสมการ (3-9) $= 3.74$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (C_g) จากสมการ (3-4)

$$\begin{aligned} C_g &= 1 + g_p(\sigma/\mu) \\ &= 1 + 3.74(0.317) \\ &= 2.19 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคาร

- หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q) หาค่าได้จากสมการที่ (2-4)

$$q = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 25^2 = 390.6 \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

- ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

  C_e ด้านต้นลม ตามความสูงจากพื้น z

  $$C_e(z) = 0.5(z/12.7)^{0.5} = 0.14z^{0.5}$$

  (โดยค่า $C_e(z)$ มีค่าในช่วง $0.5 \le C_e(z) \le 2.5$)

  C_e ด้านท้ายลม (มีค่าคงที่และคิดที่ความสูง $H/2 = 90$ เมตร)

  $$C_e = 0.5(90/12.7)^{0.5} = 1.33$$

- ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (C_p)

  C_p ด้านต้นลม $= +0.8$ (แรงดัน มีทิศเข้าหาพื้นผิว ดูรูปที่ ข.9)

  C_p ด้านท้ายลม $= -0.5$ (แรงดูด มีทิศพุ่งออกจากพื้นผิว ดูรูปที่ ข.9)

- หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคาร (p) หาค่าได้จากสมการที่ (2-2)

  ด้านต้นลม $p = I_w q C_e C_g C_p$

  $$= 1.0 \times 390.6 \times 0.14z^{0.5} \times 2.19 \times 0.8$$
  $$= 95.8 \times z^{0.5} \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

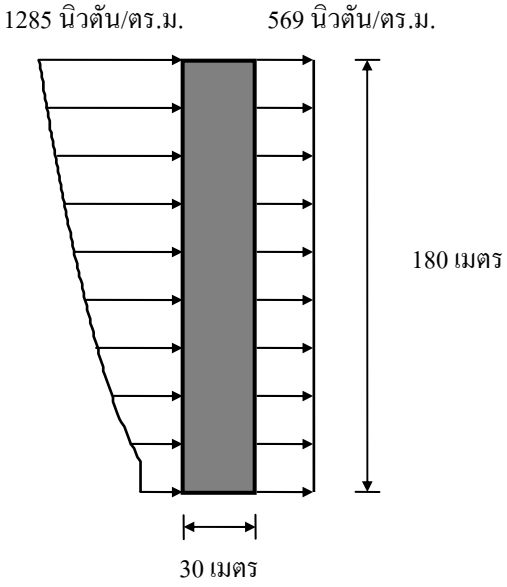
  หน่วยแรงลมด้านต้นลมที่ยอดอาคาร (H)

  $$p(H) = 95.8 \times 180^{0.5} = 1285 \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

ด้านท้ายลม p $= I_w q C_e C_g C_p$

$= 1.0 \times 390.6 \times 1.33 \times 2.19 \times (-0.5)$

$= -569$ นิวตัน/ตร.ม.



รูปที่ ต.3.4 แรงลมสถิตเทียบเท่าด้านต้นลมและท้ายลม เมื่อลมกระทำในทิศทาง xx

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณการโก่งตัวด้านข้างสูงสุดในทิศทางแนวราบ ณ ยอดอาคาร (Δ) หาค่าได้จากสมการที่ (3-12) ใช้สัมประสิทธิ์ I_w เท่ากับ 0.75 ใช้สัมประสิทธิ์ α สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ B เท่ากับ 0.5 และใช้สัมประสิทธิ์ C_p ที่เป็นผลรวมของแรงลมด้านหน้าและด้านหลังของอาคารเท่ากับ 0.8+(-0.5)=1.3

$$\Delta = \frac{3\left(\frac{H^2}{2+\alpha}\right) I_w q C_{eH} C_g C_p}{4\pi^2 n_D^2 D \rho_B H^2}$$

$$= \frac{3\left(\frac{180^2}{2+0.5}\right) \times 0.75 \times 390.6 \times 1.88 \times 2.19 \times 1.3}{4\pi^2 \times 0.20^2 \times 30 \times 200 \times 180^2}$$

$= 0.199$ เมตร

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศทางลม (a_D) หาค่าได้จากสมการที่ (3-13)

$$a_D = 4\pi^2 n_D^2 g_p \sqrt{\frac{KsF}{C_{eH}\beta_D}} \cdot \frac{\Delta}{C_g}$$

$$= 4\pi^2 \times 0.20^2 \times 3.74 \times \sqrt{\frac{0.10 \times 0.076 \times 0.26}{1.88 \times 0.015}} \times \frac{0.199}{2.19}$$

$$= 0.142 \text{ เมตร/วินาที}^2$$

<u>ข.2 แรงลมและการตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม</u>

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้

- อัตราส่วน $D/W = 30/45 = 0.667$
- ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับยอดอาคาร (V_H)

  $V_H = \overline{V}\sqrt{C_{eH}} = 25\sqrt{1.88} = 34.30$ เมตร/วินาที
- อัตราส่วน $\frac{V_H}{n_W\sqrt{WD}} = \frac{34.3}{0.25 \times \sqrt{45 \times 30}} = 3.73 < 10$ ใช้การคำนวณในบทที่ 4
- หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลมที่ระดับความสูงยอดอาคาร (q_H) หาค่าได้จากสมการที่ (4-2) $q_H = \frac{1}{2}\rho V_H^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 34.3^2 = 735.3$ นิวตัน/ตร.ม.

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม $(C_L^{'})$ หาค่าได้จากรูปที่ 4.1 หรือสมการที่ (4-3)

$$C_L^{'} = 0.0082(D/W)^3 - 0.071(D/W)^2 + 0.22(D/W)$$

$$= 0.0082(0.667)^3 - 0.071(0.667)^2 + 0.22(0.667)$$

$$= 0.117$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม หาค่าได้จากสมการที่ (4-4)

$$g_L = \sqrt{2\log_e(3600 n_W)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600 n_W)}}$$

$$= \sqrt{2\log_e(3600\times 0.25)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600\times 0.25)}}$$

$$= 3.84$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าสเปกตรัมของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม (F_L)

สำหรับ $D/W = 0.667$ และ $\frac{n_W\sqrt{WD}}{V_H} = \frac{0.25\times\sqrt{45\times 30}}{34.3} = 0.27$ ค่า F_L หาได้จากรูปที่ 4.2 หรือการคำนวณดังนี้

- สำหรับ $D/W = 0.667 < 3.0$ คำนวณ F_L จากสมการที่ (4-5) เพียงหนึ่งพจน์
- คำนวณ β_1

$$\beta_1 = \frac{(D/W)^4 + 2.3(D/W)^2}{2.4(D/W)^4 - 9.2(D/W)^3 + 18(D/W)^2 + 9.5(D/W) - 0.15} + \frac{0.12}{(D/W)}$$

$$= \frac{(0.667)^4 + 2.3(0.667)^2}{2.4(0.667)^4 - 9.2(0.667)^3 + 18(0.667)^2 + 9.5(0.667) - 0.15} + \frac{0.12}{(0.667)}$$

$$= 0.282$$

- คำนวณ λ_1

$$\lambda_1 = \frac{\left(1 + 0.38(D/W)^2\right)^{0.89}}{0.12}\frac{n_W W}{V_H}$$

$$= \frac{\left(1 + 0.38(0.667)^2\right)^{0.89}}{0.12}\frac{0.25\times 45}{34.3}$$

$$= 3.14$$

- คำนวณ F_L สำหรับ $N = 1$ และ $\kappa_1 = 0.85$

$$F_L = \frac{4\kappa_1(1 + 0.6\beta_1)\beta_1}{\pi}\times\frac{\lambda_1^2}{\left(1-\lambda_1^2\right)^2 + 4\beta_1^2\lambda_1^2}$$

$$= \frac{4 \times 0.85 \times (1 + 0.6 \times 0.282) \times 0.282}{\pi} \times \frac{3.14^2}{(1 - 3.14^2)^2 + 4 \times 0.282^2 \times 3.14^2}$$

$$= 0.0431$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม หาค่าได้จากสมการที่ (4-5)

$$R_L = \frac{\pi F_L}{4\beta_W} = \frac{\pi \times 0.0431}{4 \times 0.015} = 2.26$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม ที่ความสูง z จากพื้นดิน หาค่าได้จากสมการที่ (4-1)

$$P_L = 3 I_w q_H C_L' A \frac{z}{H} g_L \sqrt{1 + R_L}$$

$$= 3 \times 1.0 \times 735.3 \times 0.117 \times (45 \times 1) \times \frac{z}{180} \times 3.84 \times \sqrt{1 + 2.26}$$

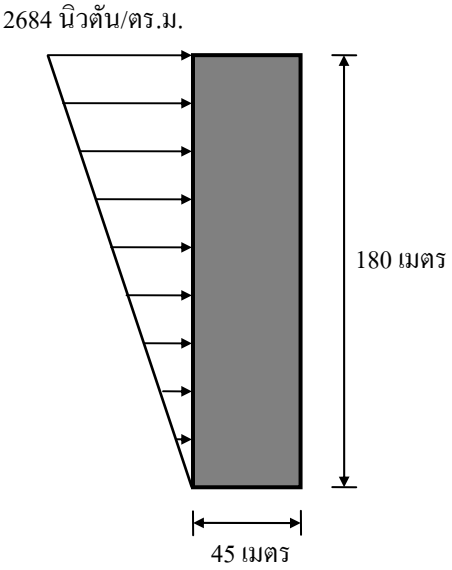
$$= 447 \times z \text{ นิวตัน ต่อความสูง 1 เมตร}$$

หรือพิจารณาเป็นหน่วยแรงลมที่กระทำต่อพื้นผิวด้านตั้งฉากกับทิศทางลม (ด้าน $D = 30$ เมตร)

$$p_L = \frac{447 \times z}{30} = 14.9 \times z \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

หน่วยแรงลมที่ยอดอาคาร (H)

$$p_L = 14.9 \times 180 = 2684 \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$



รูปที่ ต.3.5 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับแนวลม เมื่อลมกระทำในทิศทาง xx

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (a_w) ที่ยอดอาคาร $(z = H)$ หาค่าได้จากสมการที่ (4-11)

$$a_w = 3 I_w q_H C_L^{'} g_L \frac{W}{(\rho_B WD)} \frac{z}{H} \sqrt{R_L}$$

$$= 3 \times 0.75 \times 735.3 \times 0.117 \times 3.84 \times \frac{45}{200 \times 45 \times 30} \times \frac{180}{180} \times \sqrt{2.26}$$

$$= 0.186 \text{ เมตร/วินาที}^2$$

ข.3 โมเมนต์บิด

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้

- อัตราส่วน $\frac{V_H}{n_T \sqrt{WD}} = \frac{34.3}{0.30 \times \sqrt{45 \times 30}} = 3.11 < 10$ ใช้การคำนวณในบทที่ 4

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์บิด $\left(C_T^{'}\right)$ หาค่าได้จากรูปที่ 4.5 หรือสมการที่ (4-13)

$$C_T^{'} = \left\{0.0066 + 0.015\left(D/W\right)^2\right\}^{0.78}$$

$$= \left\{0.0066 + 0.015\left(0.667\right)^2\right\}^{0.78} = 0.0343$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าประกอบเชิงสถิติเพื่อปรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยให้เป็นค่าสูงสุด สำหรับการสั่นไหวของอาคารในแนวบิด หาค่าได้จากสมการที่ (4-14)

$$g_T = \sqrt{2\log_e(3600 n_T)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600 n_T)}}$$

$$= \sqrt{2\log_e(3600 \times 0.30)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\log_e(3600 \times 0.30)}}$$

$$= 3.89$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าสเปกตรัมของแรงลมในแนวบิดของอาคาร $\left(F_T\right)$

สำหรับ $D/W = 0.667$ และ $\frac{n_T\sqrt{WD}}{V_H} = \frac{0.30 \times \sqrt{45 \times 30}}{34.3} = 0.32$ ค่า F_T หาได้จากรูปที่ 4.6 หรือการคำนวณดังนี้

- คำนวณ $V_T^* = \frac{V_H}{n_T\sqrt{WD}} = 3.11$

- สำหรับ $V_T^* \le 4.5$ จากสมการ (4-18) และ (4-19)

$$K_T = \frac{-1.1\left(D/W\right) + 0.97}{\left(D/W\right)^2 + 0.85\left(D/W\right) + 3.3} + 0.17$$

$$= \frac{-1.1\left(0.667\right) + 0.97}{\left(0.667\right)^2 + 0.85\left(0.667\right) + 3.3} + 0.17 = 0.225$$

$$\lambda_T = \frac{\left(D/W\right) + 3.6}{\left(D/W\right)^2 - 5.1\left(D/W\right) + 9.1} + \frac{0.14}{\left(D/W\right)} + 0.14$$

$$= \frac{\left(0.667\right) + 3.6}{\left(0.667\right)^2 - 5.1\left(0.667\right) + 9.1} + \frac{0.14}{\left(0.667\right)} + 0.14 = 1.044$$

- คำนวณ F_T จากสมการ (4-16) โดยที่ $L = 45$ เมตร

$$F_T = \frac{0.14K_T^2\left(V_T^*\right)^{2\lambda_T}}{\pi}\frac{D\left(W^2+D^2\right)^2}{L^2W^3}$$

$$= \frac{0.14\times(0.225)^2\times(3.11)^{2\times1.044}}{\pi}\times\frac{30\times\left(45^2+30^2\right)^2}{45^2\times45^3}$$

$$= 0.0335$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าประกอบการตอบสนองแบบกำทอนต่อการแปรปรวนของลมในแนวบิดของอาคาร (R_T) หาค่าได้จากสมการที่ (4-15)

$$R_T = \frac{\pi F_T}{4\beta_T} = \frac{\pi\times0.0335}{4\times0.015} = 1.754$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าเนื่องจากลมที่กระทำกับอาคาร ที่ความสูง z จากพื้นดิน หาค่าได้จากสมการที่ (4-12)

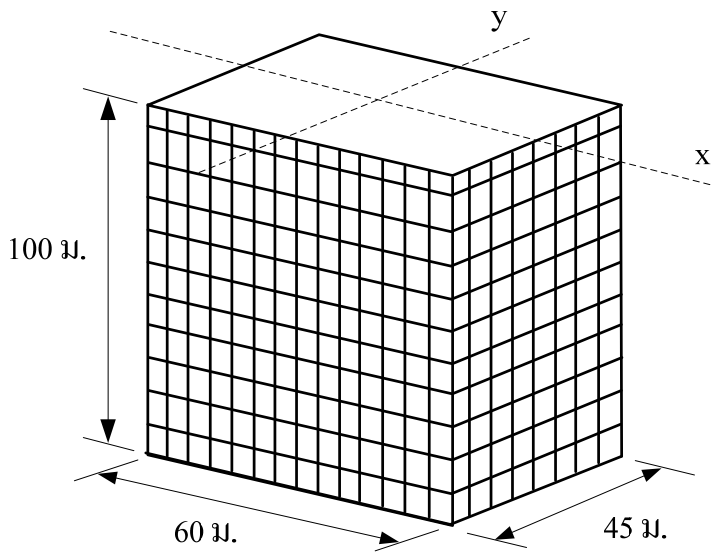
$$M_T = 1.8I_w q_H C_T' AW\frac{z}{H}g_T\sqrt{1+R_T}$$

$$= 1.8\times1.0\times735.3\times0.0343\times(45\times1)\times45\times\frac{z}{180}\times3.89\times\sqrt{1+1.754}$$

$$= 3297\times z \text{ นิวตัน-เมตร ต่อความสูง 1 เมตร}$$

จากนั้นนำแรงลมในทิศทางลม แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิด ไปรวมผลในลักษณะตามหัวข้อ 4.5

ตัวอย่างที่ 4 ให้คำนวณหน่วยแรงลมสำหรับออกแบบผนังภายนอกอาคารและหลังคาของอาคารสำนักงานที่มีขนาด 45 × 60 เมตร และมีความสูง 100 เมตร อาคารมีผนังปิดล้อมรอบทุกด้านและมีระบบระบายอากาศภายใน มีช่องเปิดเล็ก ๆ กระจายสม่ำเสมอโดยมีพื้นที่ช่องเปิดรวมน้อยกว่า 0.1% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด อาคารตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานครบริเวณที่มีสภาพภูมิประเทศแบบ B



รูปที่ ต.4.1 ขนาดของอาคาร

วิธีทำ

การคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารและหลังคา ใช้วิธีการคำนวณอย่างง่ายในการออกแบบตามมาตรฐาน

อาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และอาคารมีความสูงมากกว่าความกว้าง ดังนั้นการคำนวณค่าหน่วยแรงลมสำหรับออกแบบผนังภายนอกอาคารและหลังคาโดยวิธีการอย่างง่าย เมื่อลมกระทำในทิศทาง xx และ yy จะให้ผลลัพธ์เหมือนกัน ในตัวอย่างนี้ จะแสดงเมื่อลมกระทำในทิศทาง yy

พิจารณาลมกระทำในทิศทาง yy

ความกว้างของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับลม (W) = 60 เมตร

ความลึกของอาคารในทิศทางขนานกับลม (D) = 45 เมตร

ขั้นตอนที่1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้

สำหรับอาคารสำนักงาน อยู่ในประเภทความสำคัญปกติ ดังนั้น ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม $(I_w) = 1$

สำหรับกรุงเทพมหานคร ค่าความเร็วลมอ้างอิง $(\overline{V}) = 25$ ม./วินาที

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q)

$$q = \frac{1}{2}\rho\overline{V}^2 \quad = \quad \frac{1}{2}\times 1.25 \times 25^2 \quad = \text{ 390.625 นิวตัน/ม.}^2$$

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (C_g) สำหรับคำนวณหน่วยแรงลมภายนอก

C_g เท่ากับ 2.5 สำหรับคำนวณหน่วยแรงลมภายนอกในการออกแบบผนังภายนอกอาคาร

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายใน (C_{pi}) และค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (C_{gi}) สำหรับการคำนวณหน่วยแรงลมภายใน

เนื่องจากอาคารที่ปราศจากช่องเปิดขนาดใหญ่ มีช่องเปิดเล็ก ๆ กระจายสม่ำเสมอ โดยมีพื้นที่ช่องเปิดรวมน้อยกว่า 0.1% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ดังนั้นเป็นไปตามกรณีที่ 1 ในมาตรฐาน มีค่า $C_{pi} = 0$ ถึง -0.15 และ $C_{gi} = 2.0$ ทั้งนี้ให้ใช้ค่า C_{pi} ที่ทำให้เกิดแรงสูงสุดในองค์อาคาร (ผนังภายนอก ตัวยึด และอื่นๆ)

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหน่วยแรงลมภายใน

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศแบบ B

$$C_e = 0.7(\frac{z}{12})^{0.3} \quad = 0.7(\frac{50}{12})^{0.3} \quad = \quad 1.07 \qquad \text{(คิดที่ความสูงอ้างอิง} = 0.5H \quad = 50 \text{ ม.)}$$

คำนวณค่าหน่วยแรงลมภายใน

$p_i = I_w q C_e C_{gi} C_{pi}$ = 1 × 390.625 × 1.07 × 2 ×(-0.15 หรือ 0)

= -125.87 นิวตัน/ม^2 (เมื่อ C_{pi} = -0.15)

= 0 นิวตัน/ม^2 (เมื่อ C_{pi} = 0)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหน่วยแรงลมภายนอก และหน่วยแรงลมสุทธิ สำหรับผนังด้านต้นลมและท้ายลม

C_e ด้านต้นลม = $0.7(\frac{z}{12})^{0.3}$ ดังแสดงในตารางที่ ต.4-1

(ค่า C_e ต้องไม่น้อยกว่า 0.7)

C_e ด้านท้ายลม = $0.7(\frac{H/2}{12})^{0.3}$ = $0.7(\frac{50}{12})^{0.3} = 1.07$

C_p^* ด้านต้นลม = +0.9 (สำหรับออกแบบผนังภายนอกอาคาร ตามรูปที่ ข.9 ในมาตรฐานฯ)

C_p ด้านท้ายลม = -0.5

ตารางที่ ต.4-1 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ความสูงจากพื้นดิน (เมตร)	ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)
0 – 10	0.70
10 – 20	0.82
20 – 30	0.92
30 – 40	1.00
40 – 60	1.13
60 – 80	1.24
80 – 100	1.32

หน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำกับอาคารด้านต้นลม

$$p = I_w q C_e C_g C_p^* = 1 \times 390.625 \times \left[0.7 \left(\frac{z}{12} \right)^{0.3} \right] \times 2.5 \times 0.9$$

$= 291.94\ z^{0.3}$ นิวตัน/ม^2

ดังแสดงในตารางที่ ต.4-2 และรูปที่ ต.4.2

หน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำกับอาคารด้านท้ายลม

$$p = I_w q C_e C_g C_p = 1 \times 390.625 \times 1.07 \times 2.5 \times (-0.5)$$

$= -524.45$ นิวตัน/ม.^{2}

ดังแสดงในตารางที่ ต.4-3 และรูปที่ ต.4.2

คำนวณค่าหน่วยแรงลมสุทธิ

$$p_{net} = I_w q C_e C_g C_p^* - I_w q C_e C_{gi} C_{pi}$$

หน่วยแรงลมสุทธิด้านต้นลม

$p_{net} = 291.94\ z^{0.2}$ - (-125.87) (เมื่อ C_{pi} = -0.15)

$= 38.92\ z^{0.2}$ - (0) (เมื่อ C_{pi} = 0)

ดังแสดงในตารางที่ ต.4-2 และรูปที่ ต.4.2

หน่วยแรงลมสุทธิด้านท้ายลม

p_{net} = -524.45 - (-125.87) = -398.58 นิวตัน/ม.^{2} (เมื่อ C_{pi} = -0.15)

= -524.45 - (0) = -524.45 นิวตัน/ม.^{2} (เมื่อ $C_{pi} = 0$)

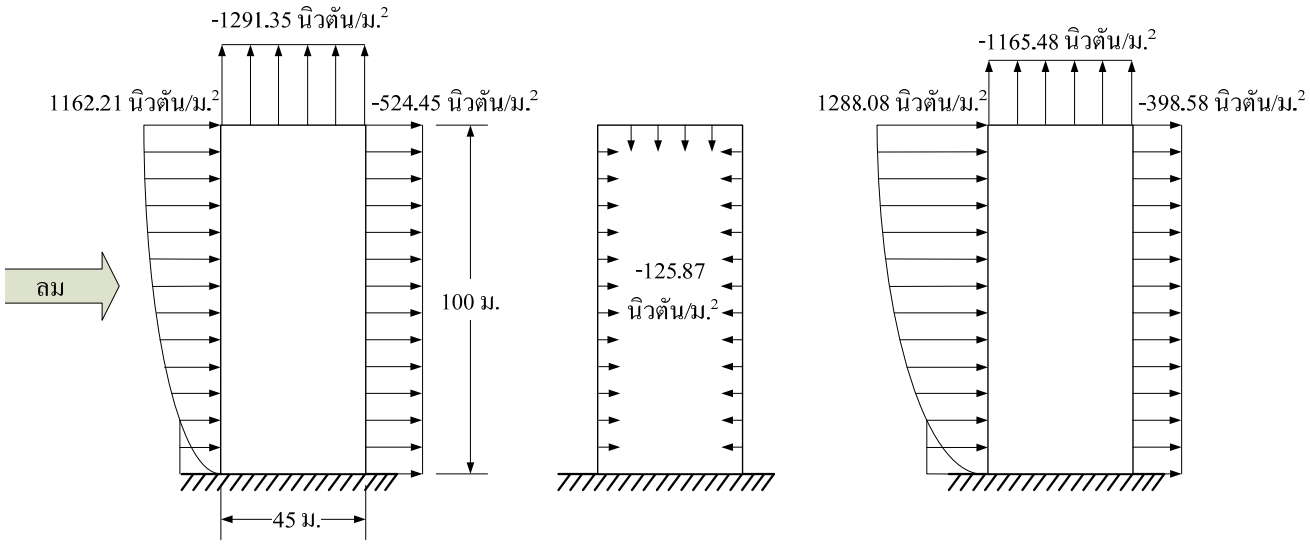
ดังแสดงในตารางที่ ต.4-3 และรูปที่ ต.4.2

ตารางที่ ต.4-2 หน่วยแรงลมภายนอก และหน่วยแรงลมสุทธิด้านต้นลม เมื่อลมกระทำในทิศทาง yy

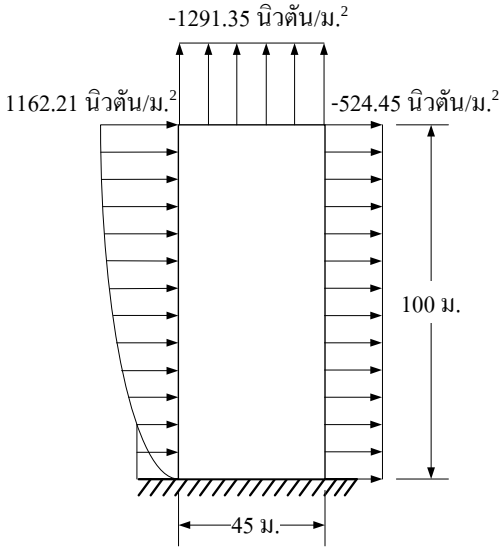
ความสูงจากพื้นดิน (ม.)	หน่วยแรงลมภายนอก (นิวตัน/ม.^{2})	หน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตัน/ม.^{2})	
		หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ	หน่วยแรงลมภายในเป็นศูนย์
0 - 10	615.23	741.10	615.23
10 - 20	717.13	842.99	717.13
20 - 30	809.89	935.75	809.89
30 - 40	882.89	1008.75	882.89
40 - 60	997.08	1122.95	997.08
60 - 80	1086.96	1212.83	1086.96
80 - 100	1162.21	1288.08	1162.21

ตารางที่ ต.4-3 หน่วยแรงลมภายนอก และหน่วยแรงลมสุทธิด้านท้ายลม เมื่อลมกระทำในทิศทาง yy

ความสูงจากพื้นดิน (ม.)	หน่วยแรงลมภายนอก (นิวตัน/ม.^{2})	หน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตัน/ม.^{2})	
		หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ	หน่วยแรงลมภายในเป็นศูนย์
0 - 100	-524.45	-398.58	-524.45



ก. หน่วยแรงลมภายนอก ข. หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ ค. หน่วยแรงลมสุทธิ เมื่อหน่วยแรงลมภายในเป็นลบ



ง. หน่วยแรงลมสุทธิเมื่อหน่วยแรงลมภายในเป็นศูนย์

รูปที่ ต.4.2 หน่วยแรงลมภายนอก หน่วยแรงลมภายใน และหน่วยแรงลมสุทธิ ด้านต้นลมและท้ายลม

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหน่วยแรงลมภายนอก และหน่วยแรงลมสุทธิ สำหรับผนังด้านข้าง

C_e ด้านข้าง $= 0.7(\frac{H}{12})^{0.3} = 0.7(\frac{100}{12})^{0.3} = 1.32$ (คิดที่ความสูงอ้างอิง H)

หน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำกับบริเวณกลางผนังด้านข้าง

C_p^* บริเวณกลางผนังด้านข้าง = -0.9

$p = I_w q C_e C_g C_p^* = 1 \times 390.625 \times 1.32 \times 2.5 \times (-0.9)$

= -1162.21 นิวตัน/ม.^{2}

ดังแสดงในตารางที่ ต.4-4

คำนวณค่าหน่วยแรงลมสุทธิที่บริเวณกลางผนังด้านข้าง

$p_{net} = I_w q C_e C_g C_p^* - I_w q C_e C_{gi} C_{pi}$ = -1162.21 - (-125.87)

= -1036.35 นิวตัน/ม.^{2} (เมื่อ C_{pi} = -0.15)

= -1162.21 - (0) = -1162.21 นิวตัน/ม.^{2} (เมื่อ C_{pi} = 0)

ดังแสดงในตารางที่ ต.4-4

หน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำกับบริเวณขอบผนังด้านข้าง ที่บริเวณ 10% ของความลึกของอาคาร

C_p^* ขอบผนังด้านข้าง = -1.2

$p = I_w q C_e C_g C_p^* = 1 \times 390.625 \times 1.32 \times 2.5 \times (-1.2)$

= -1549.62 นิวตัน/ม.^{2}

คำนวณค่าหน่วยแรงลมสุทธิที่ขอบผนังด้านข้าง

p_{net} = -1549.62 - (-125.87) = -1423.75 (เมื่อ C_{pi} = -0.15)

= -1549.62 - (0) = -1549.62 (เมื่อ C_{pi} = 0)

ดังแสดงในตารางที่ ต.4-4

ตารางที่ ต.4-4 หน่วยแรงลมภายนอก และหน่วยแรงลมสุทธิด้านข้างอาคาร เมื่อลมกระทำในทิศทาง yy

ตำแหน่งของผนังด้านข้าง	ความสูงจากพื้นดิน (ม.)	หน่วยแรงลมภายนอก (นิวตัน/ม.^{2})	หน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตัน/ม.^{2})	
			หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ	หน่วยแรงลมภายในเป็นศูนย์
บริเวณกลาง	0 - 100	-1162.21	-1036.35	-1162.21
บริเวณขอบ	0 - 100	-1549.62	-1423.75	-1549.62

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหน่วยแรงลมภายนอก และหน่วยแรงลมสุทธิ สำหรับหลังคา

C_e หลังคา $= 0.7(\frac{H}{12})^{0.3}$

$= 0.7(\frac{100}{12})^{0.3} = 1.32$ (คิดที่ความสูงอ้างอิง H)

หน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำกับบริเวณกลางหลังคา ดังแสดงในรูปที่ ต.4.3

C_p หลังคา $= -1.0$

$p = I_w q C_e C_g C_p = 1 \times 390.625 \times 1.32 \times 2.5 \times (-1.0)$

$= -1291.35$ นิวตัน/ม^2

คำนวณค่าหน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำกับบริเวณกลางหลังคา

$p_{net} = I_w q C_e C_g C_p - I_w q C_e C_{gi} C_{pi}$

$= -1291.35 - (-125.87) = -1165.48$ (เมื่อ $C_{pi} = -0.15$)

$= -1291.35 - (0) = -1291.35$ (เมื่อ $C_{pi} = 0$)

ดังแสดงในตารางที่ ต.4-5

หน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำกับขอบหลังคา ที่บริเวณ 10% ของความกว้างและความลึกของหลังคา ดังแสดงในรูปที่ ต.4.3

C_p^* ขอบหลังคา $= -1.5$

$p = I_w q C_e C_g C_p^* = 1 \times 390.625 \times 1.32 \times 2.5 \times (-1.5)$

$= -1937.02$ นิวตัน/ม^2

คำนวณค่าหน่วยแรงลมสุทธิที่ขอบหลังคา

$p_{net} = -1937.02 - (-125.87) = -1811.16$ (เมื่อ $C_{pi} = -0.15$)

$= -1937.02 - (0) = -1937.02$ (เมื่อ $C_{pi} = 0$)

ดังแสดงในตารางที่ 4-5

หน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำกับมุมหลังคา ที่บริเวณ 20% ของความกว้างและความลึกของหลังคา

C_p^* มุมหลังคา $= -2.3$

$p = I_w q C_e C_g C_p^*$

$= 1 \times 390.625 \times 1.23 \times 2.5 \times (-2.3) = -2970.10$ นิวตัน/ม^2

คำนวณค่าหน่วยแรงลมสุทธิที่มุมหลังคา

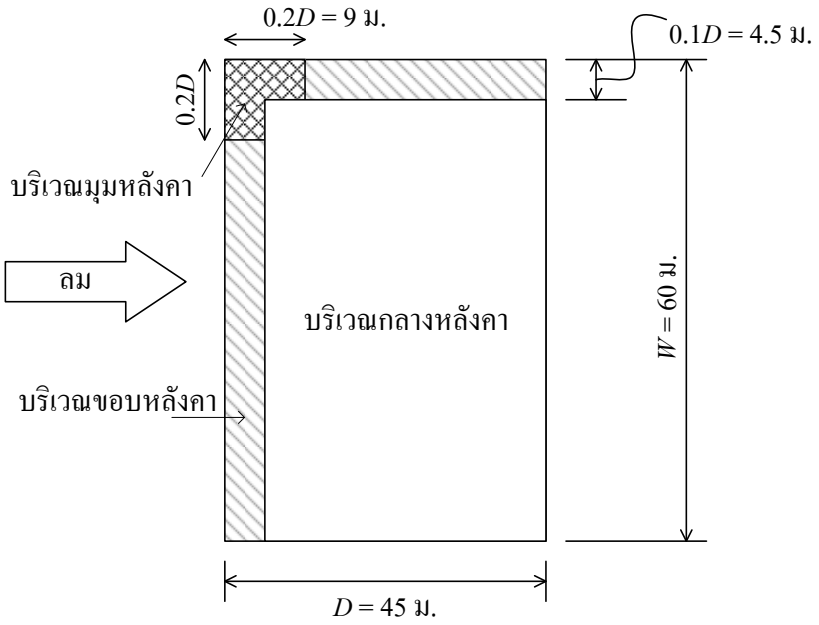
p_{net} = -2970.10 - (-125.87) = -2844.24 (เมื่อ C_{pi} = -0.15)

= -2970.10 - (0) = -2970.10 (เมื่อ C_{pi} = 0)

ดังแสดงในตารางที่ ต.4-5

ตารางที่ ต.4-5 หน่วยแรงลมภายนอก และหน่วยแรงลมสุทธิที่หลังคา เมื่อลมกระทำในทิศทาง yy

ตำแหน่งบนหลังคา	หน่วยแรงลมภายนอก (นิวตัน/ม.^{2})	หน่วยแรงลมสุทธิ (นิวตัน/ม.^{2})	
		หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ	หน่วยแรงลมภายในเป็นศูนย์
มุมหลังคา	-2970.10	-2844.24	-2970.10
ขอบหลังคา	-1937.02	-1811.16	-1937.02
กลางหลังคา	-1291.35	-1165.48	-1291.35



รูปที่ ต.4.3 รูปด้านบนของอาคาร

สรุปการออกแบบผนังภายนอกอาคารและหลังคา ใช้ค่าหน่วยแรงลมสูงสุดในการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ ต.4-6 และ ต.4-7

ตารางที่ ต.4-6 หน่วยแรงลมสุทธิสำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคาร

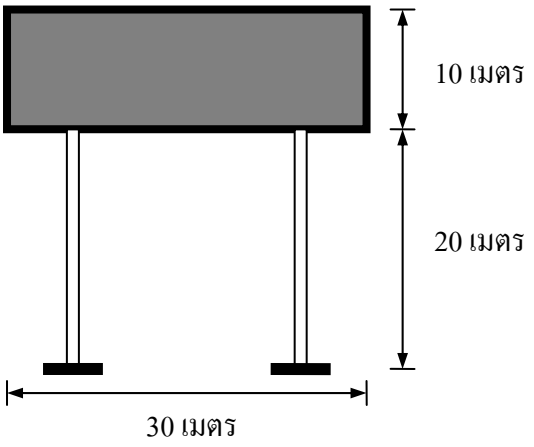
ความสูงจากพื้นดิน (ม.)	หน่วยแรงลมสุทธิสูงสุด (นิวตัน/ม.^{2})		
	หน่วยแรงดันลม	หน่วยแรงดูด	
		กลางผนัง	ขอบผนัง
0 - 10	741	-1162	-1550
10 - 20	843	-1162	-1550
20 - 30	936	-1162	-1550
30 - 40	1009	-1162	-1550
40 - 60	1123	-1162	-1550
60 - 80	1213	-1162	-1550
80 - 100	1288	-1162	-1550

ตารางที่ ต.4-7 หน่วยแรงลมสุทธิสำหรับการออกแบบหลังคา

ตำแหน่งบนหลังคา	หน่วยแรงลมสุทธิสูงสุด (นิวตัน/ม.^{2})
มุมหลังคา	-2970
ขอบหลังคา	-1937
กลางหลังคา	-1291

ตัวอย่างการคำนวณของโครงสร้างพิเศษ

ตัวอย่างที่ 5 ให้คำนวณแรงลมที่กระทำต่อแผ่นป้ายโฆษณาลักษณะแสดงดังรูปที่ 5.1 ที่มีความกว้างป้าย (b) 30 เมตร ความสูงแผ่นป้าย (d) 10 เมตร ความสูงทั้งหมดจากพื้น (h) 30 เมตร ตั้งอยู่บริเวณชานเมือง ของกรุงเทพมหานคร โดยมีความเร็วลมอ้างอิง (เป็นค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่ง สำหรับคาบเวลากลับ 50 ปี) เท่ากับ 25 เมตร/วินาที



รูปที่ ต.5.1 ป้ายโฆษณาสำหรับตัวอย่างการคำนวณ

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้

- ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม จำแนกประเภทความสำคัญของป้ายนี้เป็นระดับ ปกติ และใช้ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม (I_w) สำหรับสภาวะจำกัดด้านกำลัง (การคำนวณแรงลมสำหรับการออกแบบ) เท่ากับ 1.0

- หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม

$$q = \frac{1}{2}(\rho)\,\overline{V}^2 = \frac{1}{2}(1.25)\,25^2 = 390.6 \quad \text{นิวตัน/ตร.ม.}$$

- ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ

  ตามข้อกำหนดสำหรับการออกแบบป้าย ให้ใช้ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศตามที่กำหนดไว้ในบทที่ 2 ซึ่งสำหรับความเร็วลมอ้างอิงไม่เกิน 25 ม./วินาที กำหนดให้ใช้สภาพภูมิประเทศแบบ A เท่านั้น และคำนวณ C_e ได้จาก

$$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} = 0.631 \times z^{0.2} \qquad \text{(โดยที่ } C_e(z) \geq 0.9\text{)}$$

- ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม สำหรับป้ายโฆษณา $C_g = 2.35$

- ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ย จากตารางที่ ข.1 สำหรับ $b/d = 3.0$ และ $d/h = 0.333$

$$C_{pa} = 1.492$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหน่วยแรงลมสุทธิ

$$p = I_w q C_e C_g C_p$$

- กรณีที่ทิศทางลมตั้งฉากกับแผ่นป้าย $\left(C_p = C_{pa}\right)$

$$p = 1.0 \times 390.6 \times 0.631 \times z^{0.2} \times 2.35 \times 1.492$$

$$= 864 \times z^{0.2} \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

สำหรับหน่วยแรงลมที่ยอดป้าย $\left(z = 30\right)$ $p = 1706$ นิวตัน/ตร.ม.

- กรณีที่ขอบของป้ายชี้เข้าหาลม

  - $C_p = 1.9 C_{pa}$

$$p = 1.9 \times 864 \times z^{0.2} \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

  สำหรับหน่วยแรงลมที่ยอดป้าย $\left(z = 30\right)$ $p = 3241$ นิวตัน/ตร.ม.

  - $C_p = 0.1 C_{pa}$

$$p = 0.1 \times 864 \times z^{0.2} \text{ นิวตัน/ตร.ม.}$$

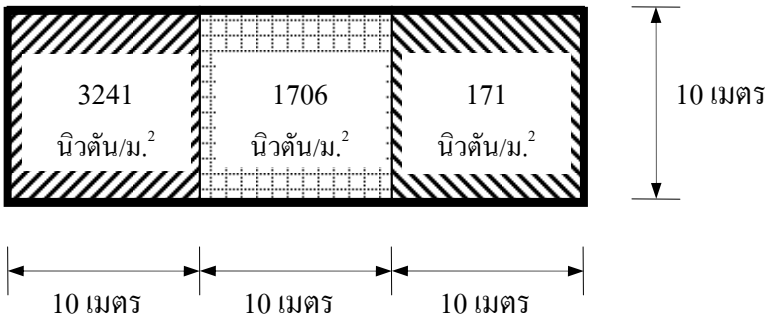
สำหรับหน่วยแรงลมที่ยอดป้าย $(z = 30)$ $p = 171$ นิวตัน/ตร.ม.

ขั้นตอนที่ 3 การจัดตำแหน่งของหน่วยแรงลม

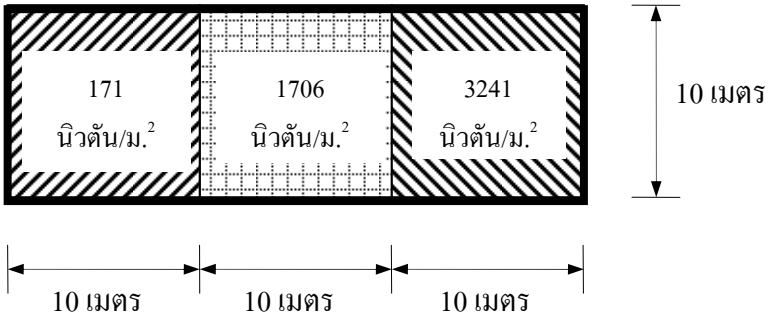
หน่วยแรงลมที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 2 ให้พิจาณาการจัดตำแน่งที่กระทำต่อแผ่นป้ายที่ทำให้เกิดหน่วยแรงสูงสุดในโครงสร้างสำหรับการออกแบบ ในกรณีดังต่อไปนี้

- กรณีที่ทิศทางลมตั้งฉากกับแผ่นป้าย

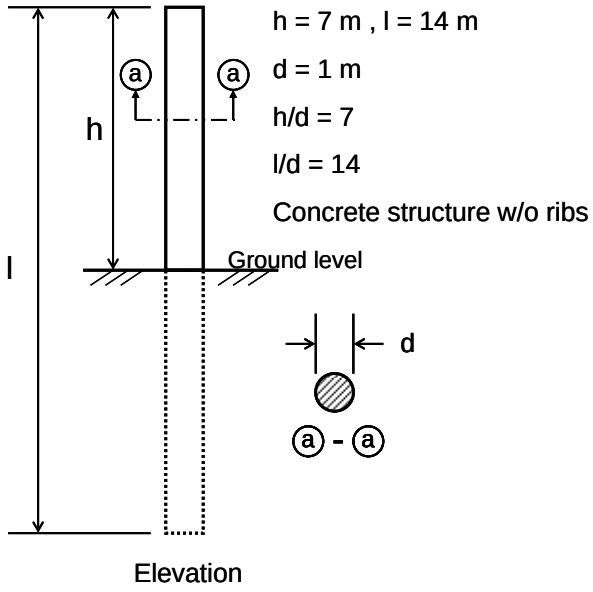
- กรณีที่ขอบด้านซ้ายของป้ายชี้เข้าหาลม



- กรณีที่ขอบด้านขวาของป้ายชี้เข้าหาลม



ตัวอย่างที่ 6 ปล่องควันของโรงงานแห่งหนึ่ง มีโครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก มีความสูง 7 เมตรเหนือพื้นดิน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร และตั้งอยู่ในพื้นที่โล่งแถบชานเมืองของกรุงเทพมหานคร โครงสร้างของปล่องควันมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกผิวเรียบและไม่มีครีบดังแสดงในรูปที่ ต.6.1



รูปที่ ต.6.1 โครงสร้างของปล่องควัน

ต.6-1 การคำนวณแรงลมลัพธ์ (แรงลมสุทธิ) ที่กระทำกับปล่องควัน

แรงลมสุทธิที่กระทำกับโครงสร้างปล่องควัน (F) สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$F = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_f \cdot A$$

โดยที่ตัวแปรต่างๆ มีค่าดังต่อไปนี้

$I_w = 1$

$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 25^2 = 390.6$ นิวตัน/ม.^{2}

$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} = \left(\frac{7}{10}\right)^{0.2} = 0.93 \ \geq 0.9$ ใช้ได้

$C_g = 2$ สำหรับการคำนวณแรงลมเพื่อออกแบบโครงสร้างหลัก

$C_f = 0.6$ ตามตารางในรูปที่ ข.12

$A = d \cdot h = 1 \times 7 = 7$ ม.^{2}

ดังนั้น $F = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_f \cdot A = 1 \times 390.6 \times 0.93 \times 2 \times 0.6 \times 7 = 3052$ นิวตัน

$= 3.05$ กิโลนิวตัน

ต.6-2 การคำนวณหน่วยแรงลมภายนอกและภายใน ที่กระทำกับปล่องควัน สำหรับออกแบบผนังของโครงสร้าง

ในกรณีที่โครงสร้างมีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม ค่าหน่วยแรงลมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโครงสร้าง จะแปรเปลี่ยนไปตามขนาดหน้าตัดของโครงสร้าง และความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบ ดังนั้นในขั้นตอนของการคำนวณค่าแรงลม ผู้ออกแบบจึงต้องทำการตรวจสอบค่า Reynolds number ว่าอยู่ในช่วงที่สามารถนำค่า สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p) ตามที่กำหนดไว้ในรูปที่ ข.12 ไปใช้ได้หรือไม่ ซึ่งในการตรวจสอบค่า Reynolds number ดังกล่าวนี้ สามารถทำได้โดยคำนวณหาค่า $d\sqrt{q \cdot C_e}$ และเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานฯ กล่าวคือ

$d\sqrt{q \cdot C_e} > 0.167$ ในกรณีที่ใช้หน่วยของค่า q เป็น กิโลนิวตัน/ม.^{2} หรือ

$d\sqrt{q \cdot C_e} > 1.686$ ในกรณีที่ใช้หน่วยของค่า q เป็น กิโลกรัม/ม.^{2}

ในกรณีของตัวอย่างนี้ ค่า $q = 0.39$ กิโลนิวตัน/ม.^{2} ดังนั้น

$d\sqrt{q \cdot C_e} = 1 \times \sqrt{0.39 \times 0.93} = 0.602$ ซึ่งมากกว่า 0.167 จึงสรุปว่าสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p) ตามที่กำหนดไว้ในรูปที่ ข.12 ไปใช้ได้

ดังนั้นค่าหน่วยแรงลมภายนอก ซึ่งมีค่าตามสมการ $P_{ext} = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_p$ สามารถคำนวณได้โดยแทนค่า ตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$I_w = 1$

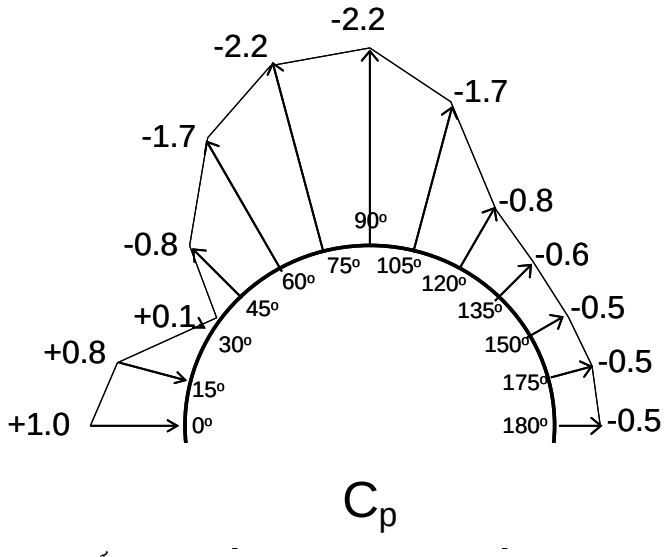
$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 25^2 = 390.6$ นิวตัน/ม.^{2}

$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} = \left(\frac{7}{10}\right)^{0.2} = 0.93$

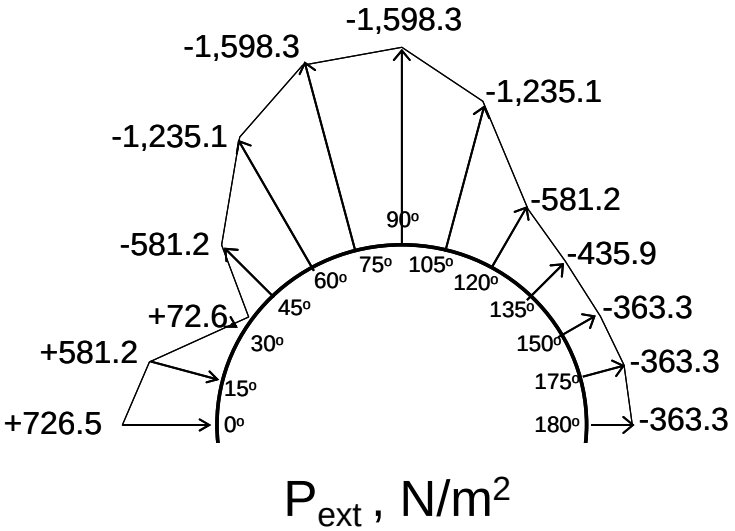
$C_g = 2$ สำหรับการคำนวณแรงลมเพื่อออกแบบผนังของโครงสร้าง ตามวิธีการอย่างง่าย

ดังนั้น $P_{ext} = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_p = 1 \times 390.6 \times 0.93 \times 2 \times C_p = 726.5 \times C_p$

รูปที่ ต.6.2 และ ต.6.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p) และค่าหน่วยแรงลมที่กระทำกับผนังของปล่องควัน ณ ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ ต.6.2 สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p) สำหรับโครงสร้างของปล่องควันตัวอย่าง



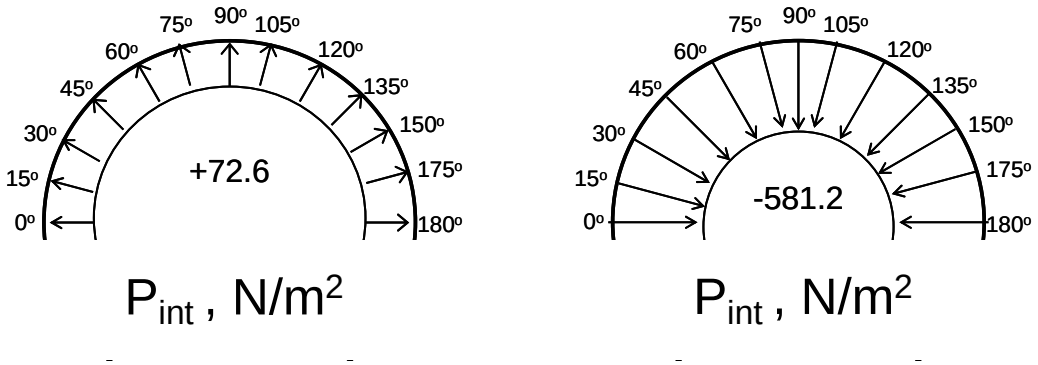
รูปที่ ต.6.3 หน่วยแรงลมภายนอกที่กระทำกับผนังของปล่องควัน ณ ตำแหน่งต่างๆ

ในการคำนวณค่าหน่วยแรงลมสำหรับออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างผนังปล่องควัน จะต้องคำนึงถึงค่าหน่วยแรงลมภายในด้วย ซึ่งในกรณีนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_{\text{int}} = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_{gi} \cdot C_{pi} = 1 \times 390.6 \times 0.93 \times 2 \times C_{pi} = 726.5 \times C_{pi}$$

ซึ่งในมาตรฐานฯ กำหนดให้ใช้ค่า $C_{pi} = +0.1$ สำหรับกรณีที่ปล่องควันกำลังทำงานเต็มที่ และ $C_{pi} = -0.8$ สำหรับกรณีที่ปล่องควันหยุดทำงาน

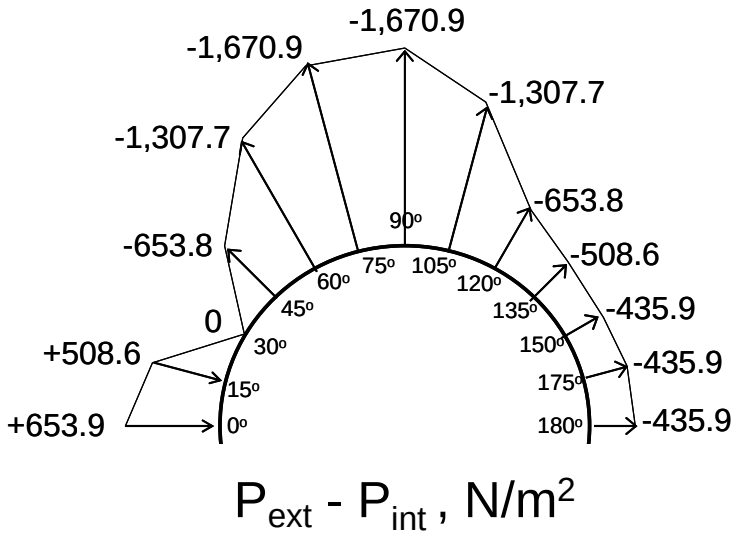
เมื่อแทนค่า C_{pi} ทั้งสองกรณีแล้ว จะได้ค่าหน่วยแรงลมภายใน ตามที่แสดงในรูปที่ ต.6.4(ก) และ ต.6.4(ข) ตามลำดับ



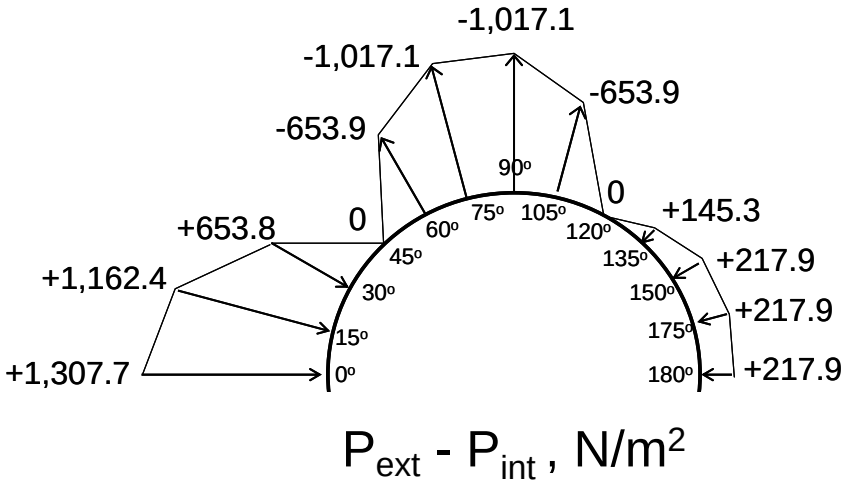
(ก) (ข)

รูปที่ ต.6.4 หน่วยแรงลมภายในของปล่องควัน ณ ตำแหน่งต่างๆ บนผนัง (ก) กรณีที่ปล่องควันทำงานเต็มที่, (ข) กรณีที่ปล่องควันหยุดทำงาน

เมื่อรวมค่าหน่วยแรงลมภายนอกและหน่วยแรงลมภายในเข้าด้วยกันแบบเวคเตอร์แล้ว จะได้ค่าหน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบ โครงสร้างของผนังปล่องควันตามที่แสดงในรูปที่ ต.6.5 และ ต. 6.6 ตามลำดับ



รูปที่ ต.6.5 หน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบโครงสร้างของผนังปล่องควัน เมื่อปล่องควันทำงานเต็มที่



รูปที่ ต.6.6 หน่วยแรงลมสุทธิสำหรับออกแบบโครงสร้างของผนังปล่องควัน เมื่อปล่องควันหยุดทำงาน