หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและวิธีการ

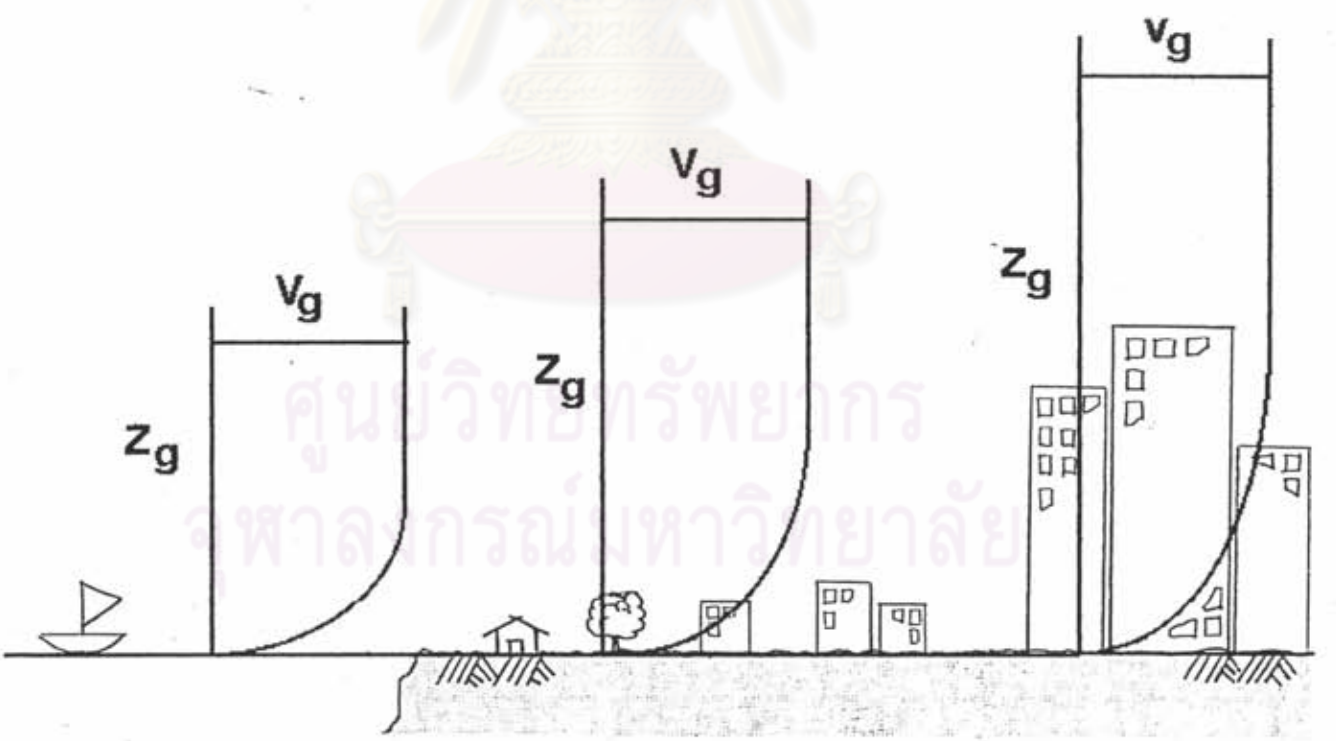
ลมและธรรมชาติของลม

ลม หรือการเคลื่อนที่ของอากาศสัมพัทธ์กับพื้นผิวโลก โดยพื้นฐานแล้วเกิดจากความแตกต่างของความดันอากาศที่ระดับความสูงเดียวกันเนื่องจากความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศระหว่างจุดที่มีความดันแตกต่างกัน

อากาศเป็นของไหลชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติความหนืด คุณสมบัตินี้ทำให้การเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณที่ติดกับพื้นผิวโลกมีค่าน้อยจนเกือบเป็นศูนย์ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นที่ชั้นการไหลของอากาศบริเวณที่ติดกับพื้นผิวโลก และได้ส่งผลต่อการไหลของอากาศในชั้นถัดๆไปที่อยู่ติดกัน ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศในชั้นต่างๆถูกรบกวน มีค่าไม่คงที่ นอกจากนี้ความเสียดทานเนื่องจากสภาพความขรุขระของพื้นผิวโลกก็มีผลรบกวนการเคลื่อนที่ของอากาศด้วย โดยทำให้การไหลของอากาศเป็นไปแบบไม่ราบเรียบ(Turbulent Flow) ซึ่งการไหลแบบนี้ ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศที่ลมพัดผ่าน อิทธิพลนี้ส่งผลต่อรูปร่างและขนาดของการกระจายความเร็วลมเฉลี่ยตามระดับความสูงจากพื้นดิน(Wind Profile) ดังแสดงในรูปที่ (2-1) จากรูปเห็นได้ว่าที่ระดับความสูงเดียวกัน ในพื้นที่ที่โล่งกว่ามีสิ่งบังลมน้อยกว่า จะมีขนาดความเร็วลมที่มากกว่าพื้นที่ที่มีสิ่งบังลมมากกว่า

ดังนั้น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศเมื่อเทียบกับพื้นผิวโลก จะเริ่มต้นจากเกือบมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณติดกับผิวโลก แล้วค่อยๆเพิ่มขนาดความเร็วตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ผลของการถูกรบกวนเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ ต่อการเคลื่อนที่ของอากาศจะมีจนถึง

ระดับความสูงหนึ่งเท่านั้น ถัดขึ้นไปจากระดับนี้แล้วความเร็วของอากาศจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก หรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย เรียกระดับความสูงนี้ว่า **ความสูงเกรเดียนท์ (Gradient Height) Zg** และเรียกความเร็วลมที่ระดับความสูงเกรเดียนท์ว่า **ความเร็วลมเกรเดียนท์ (Gradient Wind Speed) Vg** เรียกช่วงความสูงที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศถูกรบกวนว่า **ช่วงบรรยากาศชั้นขอบเขต (Boundary Layer)**

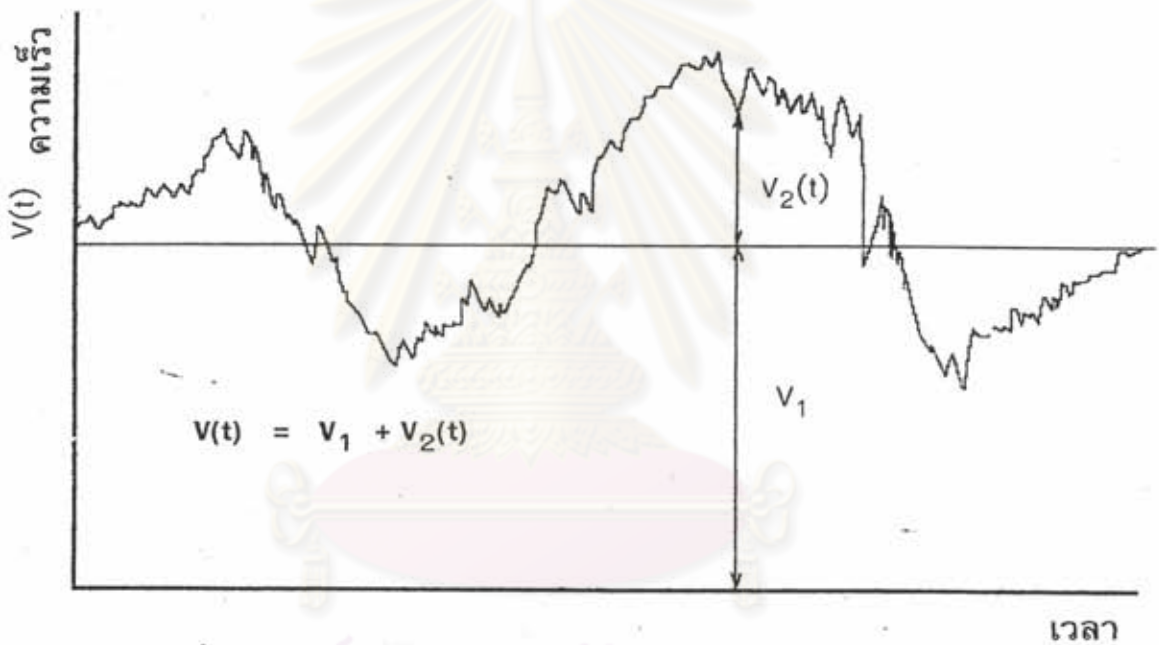


รูปที่ (2-1) แสดงการกระจายความเร็วลมเฉลี่ยตามระดับความสูง ในสภาพภูมิประเทศแบบต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธรรมชาติการไหลแบบไม่ราบเรียบของลม

เนื่องจากอากาศมีความหนืดต่ำ มีการฟุ้งกระจายได้ง่าย เมื่อเกิดการเคลื่อนที่อาจเกิดการไหลแบบไม่ราบเรียบ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางการไหลตลอดเวลา [16] ในทางวิศวกรรมโครงสร้าง อาจคิดได้ว่าความเร็วลมในธรรมชาติ V(t) ประกอบด้วยสองส่วน คือ ความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาที่พิจารณา V_1 และความเร็วลมที่แกว่งไปมา รอบๆ ความเร็วเฉลี่ยนั้นในแนวปะทะโครงสร้าง $V_2(t)$ ดังแสดงในรูปที่ (2-2) [17]



รูปที่ (2-2) แสดงการแปรเปลี่ยนความเร็วลมตามเวลา [17]

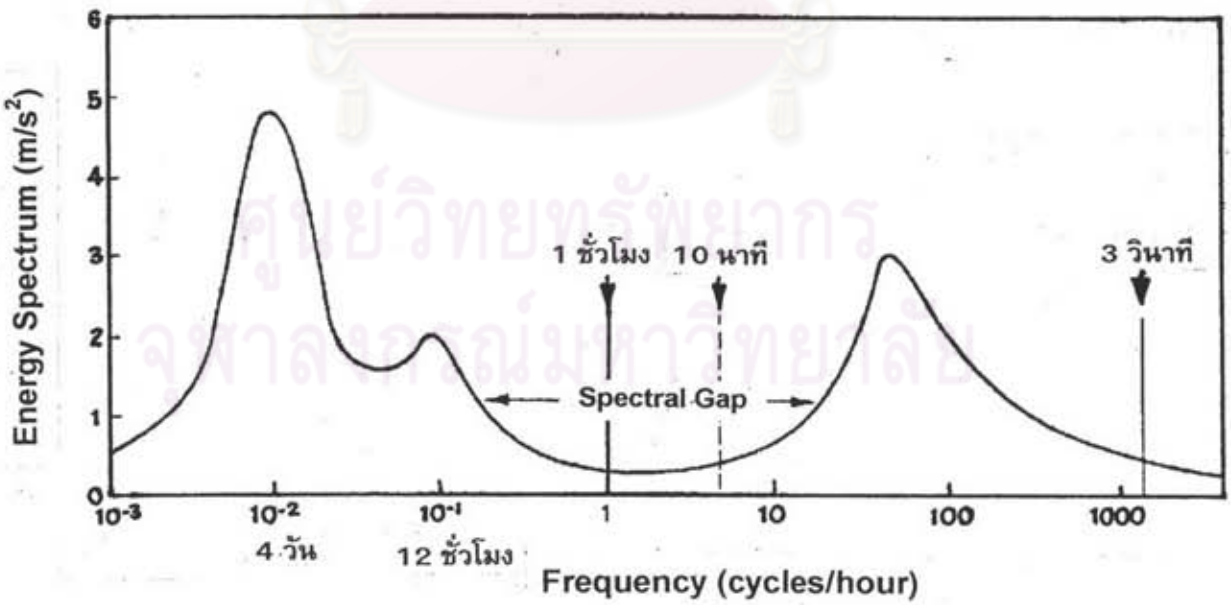
ธรรมชาติทางพลศาสตร์ของลม

เมื่อลมปะทะกับสิ่งกีดขวาง จะมีการถ่ายเทพลังงานให้กับสิ่งกีดขวางนั้น สามารถวัดหาปริมาณการถ่ายเทพลังงานนี้ด้วยตัวประกอบการตอบสนองการกรรโชก (Gust Response Factor) ถ้าลมกรรโชกมีความถี่ในการปะทะโครงสร้างใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของอาคารแล้ว จะเพิ่มการตอบสนองทางพลศาสตร์มากขึ้นไปอีก

แรงลมเนื่องจากลมกรรโชก มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลาสั้นๆ ส่งผลต่อโครงสร้างมากกว่าแรงที่ค่อยๆกระทำ การศึกษาแรงลมจึงควรคำนึงถึงผลทางพลศาสตร์ด้วย ในการที่จะคิดว่าแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเป็นพลศาสตร์ หรือสถิตศาสตร์นั้น ควรพิจารณาถึงความถี่หรือคาบของการกรรโชกของลม เทียบกับความถี่หรือคาบธรรมชาติของโครงสร้าง ถ้าลมกรรโชกกระทำในคาบที่ยาวนานกว่าคาบของอาคารก็พิจารณาเป็นสถิตศาสตร์ ในทางตรงข้ามถ้าลมกรรโชกกระทำในคาบที่สั้นกว่าก็ควรพิจารณาเป็นพลศาสตร์

เวลาเฉลี่ย

ความเร็วลมเฉลี่ย ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ทำการพิจารณา ช่วงเวลาของการพิจารณาที่สั้นอาจได้ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่สูงมาก เช่นในช่วงที่มีลมกรรโชก หากทำการพิจารณาช่วงเวลาที่ยาวนานมาก ความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้อาจมีค่าน้อย ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการพิจารณาจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ พิจารณารูปที่ (2-3) แสดงเสปคตรัมของความเร็วลมในแนวราบหรือขนานกับบริเวณพื้นผิวโลก ซึ่งทำการเก็บรวมที่ Brooklyn ในสหรัฐอเมริกา [18]



รูปที่ (2-3) แสดงเสปคตรัมของความเร็วลมในแนวราบบริเวณพื้นผิวโลก [18]

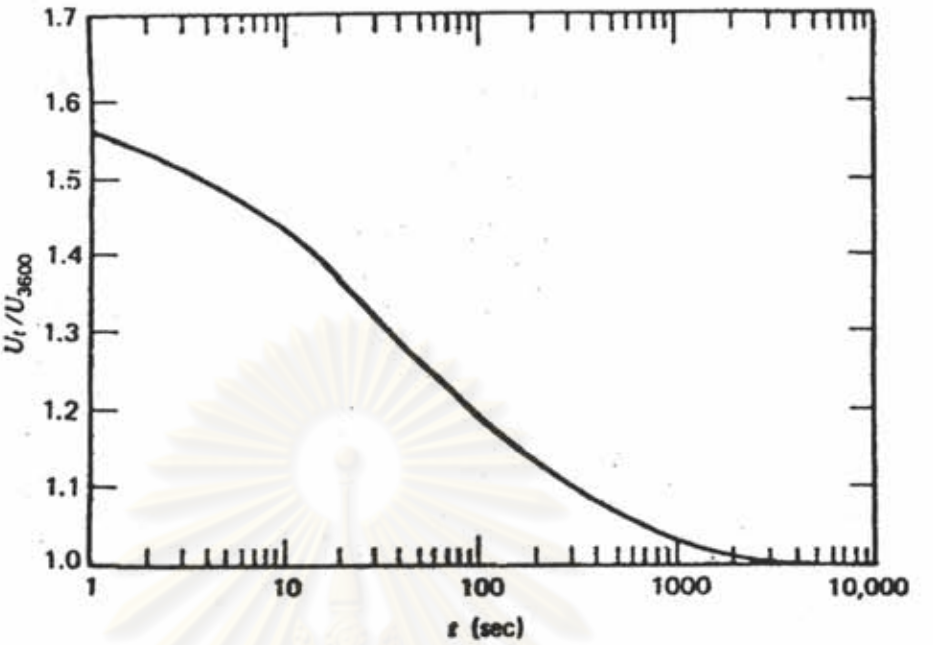
ในรูปที่ (2-3) จุดยอดของกราฟทางขวามือซึ่งอยู่ในช่วงความถี่สูง ถูกแบ่งออกจากจุดยอดทางซ้ายมือซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ โดยช่องว่างในเสปคตรัม (Spectral Gap) ซึ่งอยู่ในย่านความถี่หนึ่งรอบต่อหนึ่งชั่วโมง เนื่องจากพื้นที่ใต้กราฟในช่วงความถี่ใดๆของเสปคตรัมความเร็วลมคือพลังงานของลมในช่วงความถี่นั้นๆ ดังนั้นอาจคิดได้ว่าลมมีช่วงความถี่ที่สำคัญ 2 ช่วงคือ ลมในช่วงความถี่ต่ำ ได้แก่ในช่วงความถี่ย่านซ้ายมือของ Spectral Gap และลมในช่วงความถี่สูงซึ่งอยู่ทางขวามือของ Spectral Gap สำหรับลมในช่วงความถี่ต่ำนั้น การแปรเปลี่ยนของลมเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศในมาตราส่วนขนาดใหญ่ ส่วนลมในช่วงความถี่สูง การแปรเปลี่ยนอาจเกิดจากการกรรโชกของลมซึ่งเกิดจากการไหลแบบไม่ราบเรียบอันเนื่องจากความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ จากการสังเกตและการเก็บข้อมูลดังกล่าวพบว่าในการพิจารณาช่วงเวลาเฉลี่ยที่มากกว่า 20 นาทีจนถึง 3 ชั่วโมง ความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาเหล่านี้ค่อนข้างที่จะไม่ขึ้นอยู่กับความยาวนานของข้อมูลที่นำมาเฉลี่ย เพราะข้อมูลที่ทำการบันทึกนาน 20 นาทีขึ้นไป จะรวมเอาความถี่ที่สำคัญของการกรรโชกของลมเอาไว้ด้วย และพบว่าค่าเวลาเฉลี่ยที่เหมาะสมคือช่วงเวลาหนึ่งชั่วโมง

Durst [19] เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมในช่วงเวลา t วินาทีใดๆ กับความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง เป็นไปดังรูปที่ (2-4)

คาบการกลับ

ในการออกแบบโครงสร้างรับแรงลม ควรที่จะคำนึงถึงอายุการใช้งานและอัตราการเสี่ยงภัยของโครงสร้างนั้นต่อการรับแรงลมด้วย ลมที่มีคาบการเกิดที่ยาวนาน ย่อมมีความเร็วและความรุนแรงกว่าลมที่มีคาบการเกิดที่สั้นกว่า ดังนั้นอาคารที่มีความสำคัญต่อชีวิตและทรัพย์สินควรออกแบบให้ต้านทานต่อลมที่มีคาบการกลับที่ยาวนานกว่าอาคารทั่วไป ตารางที่(2-1)เสนอแนะค่าคาบการกลับสำหรับโครงสร้างแบบต่างๆ [20]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



เมื่อ Ut คือความเร็ว t วินาที, U_{3600} คือความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง

รูปที่ (2-4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมเฉลี่ย t วินาที กับความเร็วลมเฉลี่ยหนึ่งชั่วโมง[19]

ตารางที่ (2-1)แสดงคาบการกลับสำหรับโครงสร้างรับแรงลมแบบต่าง ๆ [20]

ประเภทโครงสร้าง	คาบการกลับ(ปี)
1. อาคารใช้งานพิเศษที่มีความสำคัญต่อชีวิตและทรัพย์สิน เช่น โรงพยาบาล, โรงไฟฟ้า เป็นต้น	100
2. โครงสร้างที่มีความสำคัญต่อชีวิตและทรัพย์สินน้อย เช่น เรือนเกษตร, อาคารโดดเดี่ยว เป็นต้น	25
3. โครงสร้างใช้งานชั่วคราว เช่นในงานก่อสร้าง	5
4. โครงสร้างชนิดอื่น นอกเหนือจากข้างต้น	50

กฎยกกำลัง

G.Hellman [21] เสนอว่า การกระจายความเร็วลมตามระดับความสูง เป็นแบบไปตามกฎยกกำลัง (Power Law)

$$(V_1 / V_2) = (Z_1 / Z_2)^{\alpha} \qquad (2-1)$$

เมื่อ V_1 คือ ความเร็วลมที่ระดับความสูงจากพื้นดิน Z_1

V_2 คือ ความเร็วลมที่ระดับความสูงจากพื้นดิน Z_2

α คือ ค่าเลขยกกำลัง ขึ้นอยู่กับสภาพความขรุขระของภูมิประเทศที่ลมพัดผ่าน

Davenport [3] ศึกษา และรวบรวมสภาพภูมิประเทศแบบต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกระจายความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ เสนอว่า ค่าตัวเลขยกกำลัง α มีค่าคงที่ที่ความสูงเกรเดียนท์หนึ่งๆและขึ้นอยู่กับความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ Davenport ได้แบ่งลักษณะความขรุขระของสภาพภูมิประเทศต่างๆออกเป็น 8 แบบ ดังแสดงในตารางที่ (2-2) และ ในสมการที่(2-2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่ระดับความสูงใดๆกับความเร็วลมเกรเดียนท์

$$(V / Vg) = (Z / Zg)^{\alpha} \qquad (2-2)$$

เมื่อ V คือความเร็วลมที่ระดับความสูงจากพื้นดิน Z

Vg คือความเร็วลมเกรเดียนท์ที่ระดับความสูงเกรเดียนท์ Zg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่(2-2) แสดงการแบ่งลักษณะความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ,ค่าความสูงเกรเดียนท์และค่าตัวเลขยกกำลัง [3]

แบบ	สภาพภูมิประเทศ	α	Zg (เมตร)
1	พื้นที่ผิวราบเรียบมาก เช่นสภาพผืนน้ำเปิดกว้างโล่ง	1/8.5	245
2	พื้นที่ราบ มีสิ่งบดบังผิวหน้าขนาดต่ำ เช่น ทุ่งหญ้ากว้าง, ทะเลทราย	1/7.5	275
3	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีสิ่งบดบังพื้นผิวขนาดใหญ่ขึ้น เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีต้นไม้และสิ่งปลูกสร้างกระจัดกระจายห่างกันมากๆ	1/6.5	300
4	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีวัตถุหรือแนวสิ่งกีดขวางทางลมขนาดเตี้ย เช่นทุ่งนาโล่งมีแนวต้นไม้เตี้ยๆ และมีสิ่งปลูกสร้างกระจัดกระจาย .	1/5.5	335
5	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน พื้นผิวกระจายไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดต่างๆจำนวนมาก เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีพื้นที่โล่งน้อย มีแนวต้นไม้กีดขวางทางลมหนาแน่นกว่าแบบที่4 หรือมีอาคารขนาด 2 ชั้นกระจัดกระจาย	1/4.5	365
6	พื้นที่ลุ่มดอนหรือพื้นที่ราบ มีสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากและสม่ำเสมอ เช่น ป่า,ป่าแคระ หรือ อุทยานป่า	1/3.5	410
7	พื้นที่กระจายเต็มไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่ เช่น พื้นที่ในเมือง หรือบริเวณรอบๆเมืองขนาดใหญ่ๆ	1/3	460
8	พื้นที่เต็มไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่โตมาก เช่น บริเวณใจกลางเมืองหลวงขนาดใหญ่	1/2.5 – 1/1.5	550

ทฤษฎีค่าปลายสุด

ลมมีธรรมชาติการเกิดแบบสุ่มและไม่แน่นอน ทิศทางและขนาดของความเร็วลมก็ไม่แน่นอนทำนายได้ยาก ถือได้ว่าความเร็วลมเป็น **ตัวแปรสุ่ม (Random Variable)** ค่าความเร็วลมที่มากที่สุด หรือน้อยที่สุดในช่วงเวลาที่ทำการพิจารณาเรียกว่า **ค่าปลายสุด (Extreme Value)** ถือว่าเป็นตัวแปรสุ่มด้วยเช่นกัน

ถ้าให้ X เป็นตัวแปรสุ่มของประชากรข้อมูลความเร็วลม มีฟังก์ชันการกระจาย (Distribution Function) เป็น $F_X(x)$ เมื่อ x คือค่าจากการสังเกต(Observed Value) ทำการพิจารณาตัวอย่างขนาด n ของประชากรของ X ซึ่งแต่ละตัวอย่างที่พิจารณาเป็นเซตของการสังเกต $(x_1,x_2,x_3,.....,x_n)$ แทนค่าจากการสังเกตค่าที่ 1,2,3 และ n ตามลำดับ เนื่องจากทุกๆ ค่าจากการสังเกตนี้ไม่สามารถที่จะทำนายได้ก่อนที่จะทำการสังเกต จึงกล่าวได้ว่าค่าจากการสังเกตแต่ละค่าก็เป็นตัวแปรสุ่มด้วย เนื่องจากว่าเซตของการสังเกต $(x_1,x_2,x_3,.....,x_n)$ ก็คือค่าที่ปรากฏเป็นจริงของตัวอย่างของตัวแปรสุ่ม $(X_1,X_2,X_3,.....,X_n)$ ดังนั้น ในการกล่าวถึงค่าปลายสุดของตัวอย่างที่ทำการสังเกตขนาด n ก็หมายความว่า เรากำลังพิจารณาค่าที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุด ของตัวแปรสุ่ม $(X_1,X_2,X_3,.....,X_n)$

ถ้าให้ Yn เป็นค่าปลายสุด ดังนั้น

$$Yn = \text{ค่าที่มากที่สุดของ } (X_1,X_2,X_3,.....,X_n)$$

เนื่องจาก $X_1,X_2,X_3,.....,X_n$ เป็นตัวแปรสุ่ม ดังนั้น Yn จึงเป็นตัวแปรสุ่มด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายความน่าจะเป็นของค่าปลายสุด

ความเร็วลมเป็นตัวแปรสุ่มและมีค่าไม่แน่นอน สามารถทำนายหาความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเร็วลมสูงสุดได้โดยใช้วิธีการทางสถิติ ด้วยวิธีการกระจายความน่าจะเป็นของค่าปลายสุด (Probability Distribution of Extreme Value)

เนื่องจากค่าปลายสุดเป็นตัวแปรสุ่มซึ่งได้มาจากประชากรขนาด n ของตัวแปรสุ่ม X ดังนั้นการกระจายความน่าจะเป็นของค่าปลายสุดจึงสามารถหาได้จาก การกระจายของตัวแปรสุ่ม X

ถ้า $X_1, X_2, X_3, \ldots\ldots, X_n$ มีความไม่ขึ้นต่อกันทางสถิติ และมีการกระจายแบบเดียวกัน ดังนั้น

$$F_{X1}(x) = F_{X2}(x) = \ldots\ldots = F_{Xn}(x) \qquad (2\text{-}3)$$

สำหรับค่าปลายสุด จะสังเกตได้ว่าถ้า Yn คือค่าที่มากที่สุดของเซตตัวแปรสุ่ม $(X_1, X_2, X_3, \ldots\ldots, X_n)$และ ถ้า Yn น้อยกว่าค่าใดๆค่าหนึ่งเช่น y แล้ว ทุกๆค่าของตัวแปรสุ่มจะน้อยกว่า y ด้วย

ถ้าฟังก์ชันการกระจายของค่าปลายสุด Yn คือ

$$F_{Yn}(y) = \text{ความน่าจะเป็นที่ Yn น้อยกว่า หรือเท่ากับ } y$$
$$= P(Yn \leq y) \qquad (2\text{-}4)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้น $F_{Yn}(y) = P(X1 \le y, X2 \le y, \ldots\ldots\ldots\ldots, Xn \le y)$

$$= [\ F_X(y)\ ]^n \qquad (2\text{-}5)$$

สมการที่ (2-5) คือฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นของค่าปลายสุด Yn ที่หาได้จากการกระจายของตัวแปรสุ่ม X และฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นคือ

$$f_{Yn}(y) = [\ \partial F_{Yn}(y)\ ] / [\ \partial y\ ]$$

$$= n\,[\ F_X(y)\ ]^{n-1}\ f_X(y) \qquad (2\text{-}6)$$

การกระจายค่าปลายสุดแบบที่ 1

Gumbell [21] เสนอการกระจายค่าปลายสุดแบบที่1 (Distribution of Extreme Value Type I) ซึ่งมีฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นคือ $F_{yn}(y)$

$$F_{yn}(y) = e^{-e^{-\alpha_n(y-U_n)}} \qquad (2\text{-}7)$$

เมื่อ α_n คือ สัมประสิทธิ์วัดการกระจายของข้อมูล

U_n คือ ฐานนิยมของข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $f_{Yn}(y)$

$$f_{Yn}(y) = \alpha_n\, e^{-\alpha_n(y-U_n)}\ e^{-e^{-\alpha_n(y-U_n)}} \qquad (2\text{-}8)$$

สำหรับตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายเริ่มแรก ที่มีหางไปในทางค่าปลายสุดแบบเอกซ์โปเนนเชียล จะมีฟังก์ชันการกระจายค่าปลายสุดเข้าใกล้แบบที่ 1 นี้

เนื่องจากว่า $F_{yn}(y) = P(Yn \leq y)$

ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเร็วลมสูงสุด V ในปีใดๆ คือ

$$P(V) = F_{Yn}(V) = e^{-e^{-\alpha_n(V-U_n)}} \qquad (2\text{-}9)$$

สามารถหาความเร็วสูงสุด V ได้ คือ

$$V = U_n - (1/\alpha_n) \operatorname{Ln} (-\operatorname{Ln} P(V)) \qquad (2\text{-}10)$$

Thom [4] เสนอว่า สามารถหา ความน่าจะเป็น P(V) ได้จากสมการ(2-11)

$$P(V) = m/(n+1) \qquad (2\text{-}11)$$

เมื่อ m คือ อันดับของข้อมูลที่ทำการเรียงลำดับแล้ว

n คือ ขนาดประชากรของข้อมูล

จากทฤษฎีของความน่าจะเป็น คาบการกลับ (Return Period) R มีค่าเท่ากับ

$$R = 1/(1-P(V)) \qquad (2\text{-}12)$$

ดังนั้น สามารถหาความเร็วสูงสุด V ได้ในรูป

$$V = U_n - (1/\alpha_n) \operatorname{Ln} (-\operatorname{Ln} (1-1/R)) \qquad (2\text{-}13)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ด้วยระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สามารถหาค่า parameter $1/\alpha_n$ และ U_n ได้

$$1/\alpha_n = [n \Sigma(R_i V_i) - \Sigma(R_i)\Sigma(V_i)] / [n\Sigma(R_i^2) - \Sigma(R_i)^2] \quad (2\text{-}14)$$

$$U_n = [n \Sigma(V_i) - (1/\alpha_n) \Sigma(R_i)] / n \quad (2\text{-}15)$$

เมื่อ $R_i = - Ln [- Ln P(V_i)]$

V_i คือ ข้อมูลความเร็วลมที่ทำการสังเกตเก็บรวบรวม เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

ข้อกำหนดแรงลม National Building Code 1990

ตามข้อกำหนดเกี่ยวกับแรงลมของมาตรฐาน National Building Code 1990 [2] กำหนดว่าหน่วยแรงลม ที่กระทำตั้งฉากต่อผิวอาคารภายนอก สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$P = q Ce Cg Cp \quad (2\text{-}16)$$

เมื่อ P คือ หน่วยแรงดันสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Pressure) ซึ่งกระทำในแนวตั้งฉากกับผิวอาคาร

q คือ หน่วยแรงดันลมอ้างอิง (Reference Wind Pressure)

Ce คือ ตัวประกอบสภาพภูมิประเทศ (Exposure Factor)

Cg คือ ตัวประกอบผลการกรรโชก (Gust Effect Factor)

Cp คือ สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดัน (Pressure Coefficient)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อกำหนด NBC 1990 ได้กล่าวถึงการคำนวณหาแรงลม เพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างไว้ 3 แบบ คือ

1. การคำนวณอย่างง่าย (Simple Procedure) สำหรับอาคารขนาดความสูงต่ำ หรือขนาดปานกลาง หรือโครงสร้างที่ค่อนข้างแข็ง ไม่อ่อนตัว ซึ่งไม่ต้องการการคำนวณที่คำนึงถึงผลทางพลศาสตร์มากนัก สามารถคิดว่าแรงลมที่กระทำเป็นแรงกระทำสถิตเทียบเท่า

2. การคำนวณอย่างละเอียด (Detailed Procedure) สำหรับอาคารที่สูงและอ่อนตัว เมื่ออาคารมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างมากกว่า 4 หรือมีความสูง 120 เมตรขึ้นไป การคำนวณโดยละเอียดนี้ ได้คิดถึงผลทางพลศาสตร์ อันเนื่องมาจากการตอบสนองต่อการกรรโชกของอาคาร ซึ่งผลการคำนวณจะได้ตัวประกอบผลการกรรโชก และนำไปคำนวณหาหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าในที่สุด

3. การทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind Tunnel Testing) เหมาะสำหรับโครงสร้างที่คำนึงถึงผลทางพลศาสตร์เป็นพิเศษ

ในการคำนวณตามข้อกำหนดนี้ มีรายละเอียดและสิ่งที่ต้องใช้ในการคำนวณดังนี้

1) <u>ความเร็วลมอ้างอิง (Reference Wind Speed)</u> ,V คือ ความเร็วลมที่ระดับความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศเปิดโล่ง

2) <u>หน่วยแรงลมอ้างอิง (Reference Wind Pressure)</u> ,q คือ หน่วยแรงลมที่ระดับความสูงอ้างอิง 10 เมตร โดยที่

$$q = CV^2 \qquad (2\text{-}17)$$

$q = \rho V^2/2$; ρ คือความหนาแน่นอากาศ มีค่าเท่ากับ 1.2929 กก/ม^3 ที่ อุณหภูมิ 0 ^{o}C และที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน โดยทั่วไปมีค่า 1.25 กก/ม^3 ที่อุณหภูมิ 30 ^{o}C

$= 0.0637\ V^2$ กก/ม^2 เมื่อ V มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

3) ตัวประกอบสภาพภูมิประเทศ (Exposure Factor) ,Ce คือ ตัวประกอบที่ใช้ในการคำนวณหาการกระจายแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างตามระดับความสูงต่าง ๆจากระดับพื้นดิน ในการคำนวณอย่างง่าย สามารถหา Ce ได้จากความสัมพันธ์ $(h/10)^{1/5}$ แต่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.9 เมื่อ h คือ ความสูงจากระดับพื้นดิน ในหน่วยเมตร หรือหาค่าได้ตามตารางที่ (2-3)

ตารางที่ (2-3) แสดงค่าตัวประกอบสภาพภูมิประเทศ Ce สำหรับการคำนวณอย่างง่าย[2]

ความสูง (เมตร)	Ce
0-6	0.9
6-12	1.0
12-20	1.1
20-30	1.2
30-44	1.3
44-64	1.4
64-85	1.5
85-140	1.6
140-240	1.8
240-400	2.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการคำนวณอย่างละเอียดแบ่งสภาพภูมิประเทศออกเป็น 3 แบบ คือ

แบบ A : สภาพภูมิประเทศแบบโล่ง มีอาคาร หรือต้นไม้กระจัดกระจาย เช่น พื้นที่เป็นพื้นน้ำเปิดโล่ง หรือบริเวณชายฝั่งที่ราบเรียบ เป็นสภาพภูมิประเทศที่ใช้อ้างถึงความเร็วลมอ้างอิง

$$Ce = (Z/10)^{0.28} \qquad (2\text{-}18)$$

แบบ B : สภาพภูมิประเทศบริเวณชานเมือง หรือนอกเมืองหลวง หรือ พื้นที่ป่าไม้อุดมสมบูรณ์ หรือบริเวณใจกลางเมืองเล็กๆ

$$Ce = 0.5\,(Z/12.7)^{0.50} \qquad (2\text{-}19)$$

แบบ C : สภาพภูมิประเทศบริเวณใจกลางเมืองหลวง มีอาคารสูงหนาแน่น อย่างน้อย 50 % ของอาคารควรมีขนาดเกิน 4 ชั้น

$$Ce = 0.4\,(Z/30)^{0.72} \qquad (2\text{-}20)$$

เมื่อ Z คือ ความสูงจากพื้นดิน หน่วยเป็น เมตร

สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ B และ C นั้น ควรใช้เมื่อรู้สภาพภูมิประเทศที่ถูกต้อง ซึ่งอยู่ในทิศทางที่ลมพัดผ่านอย่างน้อย 1.5 กิโลเมตร

สามารถเปรียบเทียบการแบ่งสภาพภูมิประเทศตามแบบของมาตรฐาน NBC 1990 และตามแบบของ Davenport ได้ดังตารางที่ (2-4)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ (2-4) แสดงการเปรียบเทียบการแบ่งลักษณะภูมิประเทศ

แบบ	สภาพภูมิประเทศ							
Davenport, 1960[3]	1	2	3	4	5	6	7	8
NBC 1990[2]	A				B		C	

เมื่อ A คือ สภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่งมีอาคารหรือต้นไม้กระจัดกระจาย

B คือ สภาพภูมิประเทศบริเวณชานเมือง หรือบริเวณใจกลางเมืองเล็กๆ

C คือ สภาพภูมิประเทศบริเวณใจกลางเมืองหลวง

1 คือ พื้นที่ที่ราบเรียบมาก เช่นบริเวณชายทะเลโล่งกว้าง

2 คือ พื้นที่ราบมีสิ่งปกคลุมพื้นผิวขนาดต่ำ

3 คือ พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีสิ่งปกคลุมพื้นผิวขนาดใหญ่ขึ้น

4 คือ พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีสิ่งกีดขวางทางลมขนาดเตี้ยกระจัดกระจาย

5 คือ พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีแนวสิ่งกีดขวางทางลมกระจัดกระจาย

6 คือ พื้นทีราบหรือลุ่มดอน มีสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่ เป็นจำนวนมากและสม่ำเสมอ

7 คือ พื้นที่ในเมืองหรือบริเวณรอบๆเมืองใหญ่

8 คือ พื้นที่บริเวณใจกลางเมืองหลวง

4) ตัวประกอบผลการกรรโชก (Gust Effect Factor) ,Cg คืออัตราส่วนของ ผลสูงสุดต่อผลเฉลี่ยของการรับแรงของโครงสร้าง ในการคำนวณอย่างง่าย Cg มีค่าเท่ากับ 2.0 สำหรับส่วนของโครงสร้างทั้งหมด หรือเท่ากับ 2.5 สำหรับส่วนประกอบขนาดเล็กของโครง-สร้าง

ในการคำนวณอย่างละเอียด สามารถหาตัวประกอบผลการกรรโชก Cg ได้ดังนี้

นิยามให้ $$Cg = Wp/\mu \quad (2\text{-}21)$$

เมื่อ Wp คือ ผลสูงสุดต่อการรับแรง (Peak Loading Effect)

มีค่าเท่ากับ $$Wp = \mu + g_p\sigma \quad (2\text{-}22)$$

เมื่อ μ คือ ผลเฉลี่ยต่อการรับแรง (Mean Loading Effect)

g_p คือ ตัวประกอบผลการรับแรงสูงสุดทางสถิตศาสตร์

σ คือ รากกำลังสองเฉลี่ย ของผลการรับแรง

จากสมการที่ (2-22)ได้ว่า

$$Wp/\mu = 1 + g_p(\sigma/\mu) \quad (2\text{-}23)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2-21) และ (2-23) ตัวประกอบผลการกรรโชก Cg มีค่าเท่ากับ

$$Cg = 1 + g_p(\sigma/\mu) \quad (2\text{-}24)$$

นิยามให้ $$\sigma/\mu = \sqrt{(K/C_{eH})(B + sF/\beta)} \quad (2\text{-}25)$$

เมื่อ K ในสมการที่ (2-25) คือ ตัวประกอบซึ่งมีความสัมพันธ์กับ ลักษณะความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ มีค่าดังนี้

K = 0.08 สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ A

K = 0.10 สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ B

และ K = 0.14 สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ C

เมื่อ C_{eH} ในสมการที่ (2-25) คือ ตัวประกอบสภาพภูมิประเทศที่ระดับสูงสุดของอาคาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ B ในสมการที่ (2-25) คือ Background Turbulence Factor เป็นฟังก์ชันของความสูงของอาคาร และอัตราส่วนความกว้างด้านรับลมต่อความสูงของอาคาร สามารถหาได้จากสมการที่ (2-26) หรือจากรูปที่ (2-5)

$$B = 4/3 \int_{0}^{914/H} [1/(1+xH/457)][1/(1+xW/122)][x/(1+x^2)^{4/3}]dx \quad (2\text{-}26)$$

เมื่อ H คือ ความสูงของอาคารด้านปะทะลม

เมื่อ W คือ ความกว้างของอาคารด้านปะทะลม

เมื่อ s คือ ตัวประกอบลดขนาด (Size Reduction Factor)เป็นฟังก์ชันของ W/H และ n_o และ V_H ตัวประกอบนี้สามารถหาได้จากสมการที่ (2-27) หรือจากรูปที่ (2-6)

$$s = p/3\,[1/(1 + 8n_oH/3V_H)]\,[1/(1 + 10n_oW/V_H)] \quad (2\text{-}27)$$

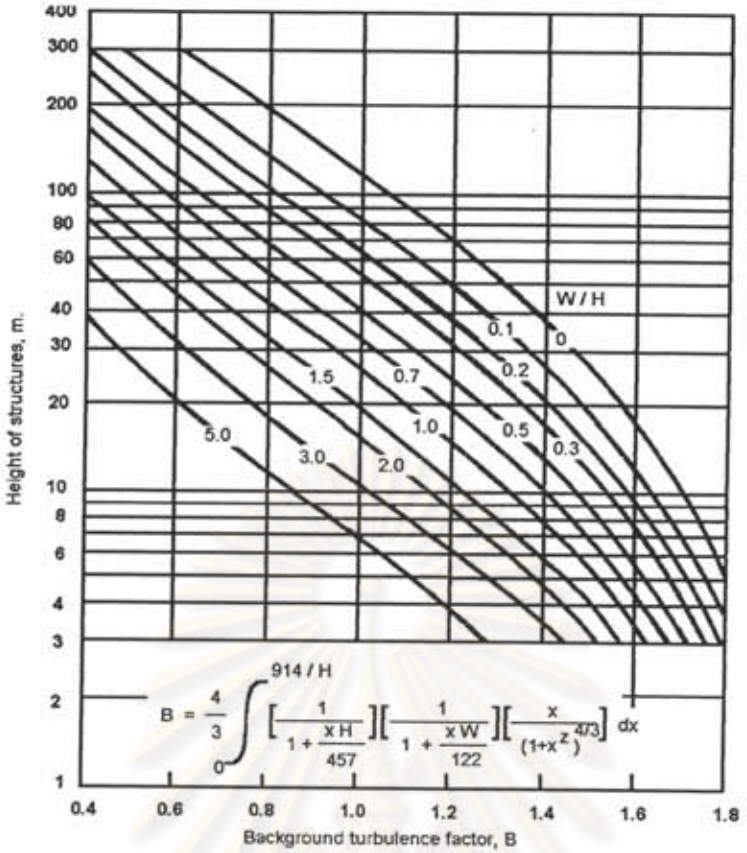
เมื่อ n_o คือความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหวของอาคาร หน่วยเป็น เฮิร์ตซ์

เมื่อ V_H คือความเร็วลมเฉลี่ย ที่ระดับความสูงบนยอดสูงสุดของอาคาร H มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

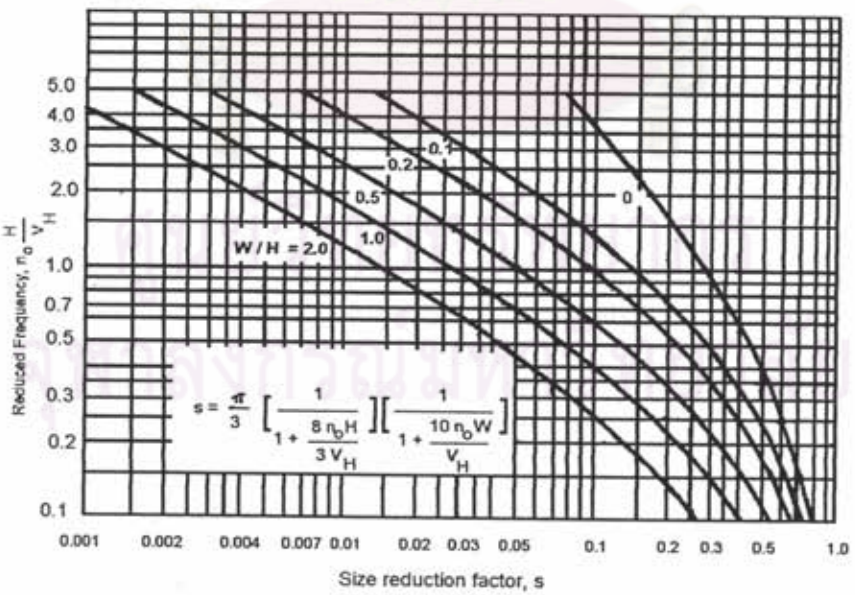
เมื่อ F ในสมการที่ (2-25) คืออัตราส่วนพลังงานกรรโชก(Gust Energy Ratio) ที่ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง สามารถหาได้จากสมการที่ (2-28) หรือได้จากรูปที่ (2-7)

$$F = x_o^2/(1+x_o^2)^{4/3} \quad (2\text{-}28)$$

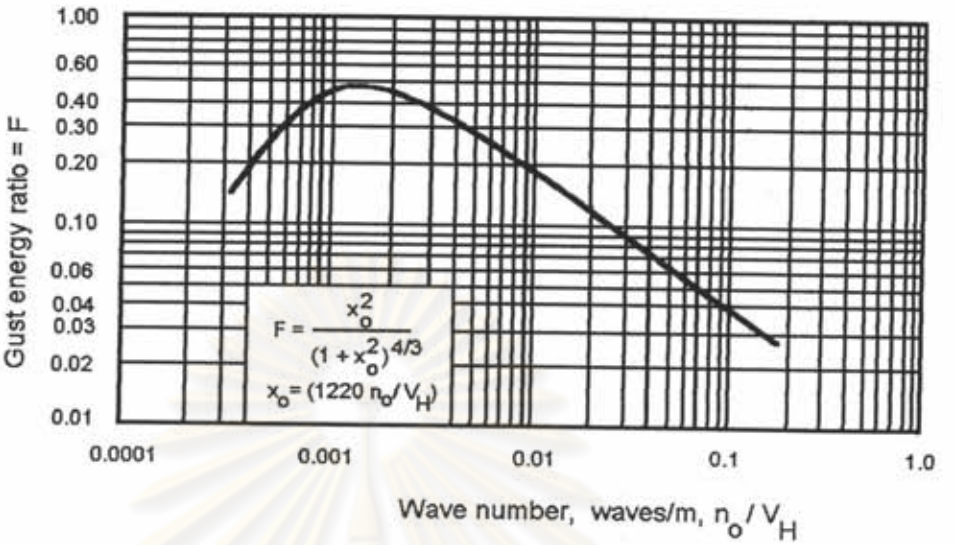
$$x_o = 1220n_o/V_H \quad (2\text{-}29)$$



รูปที่ (2-5) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Background Turbulence Factor, B กับความสูงของโครงสร้าง [2]



รูปที่ (2-6) รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบลดขนาด s, Reduced Frequency n_o และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง W/H [2]



รูปที่ (2-7) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Gust Energy Ratio,F และค่า Wave Number [2]

เมื่อ β ในสมการที่ (2-25) คือ อัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ(Critical Damping Ratio) หาได้จากการทดสอบในโครงสร้างจริง มีค่าเท่ากับ 0.01 สำหรับโครงสร้างเหล็ก และมีค่าเท่ากับ 0.02 สำหรับโครงสร้างคอนกรีต

5) <u>ตัวประกอบผลการรับแรงสูงสุดทางสถิติศาสตร์</u>, g_p

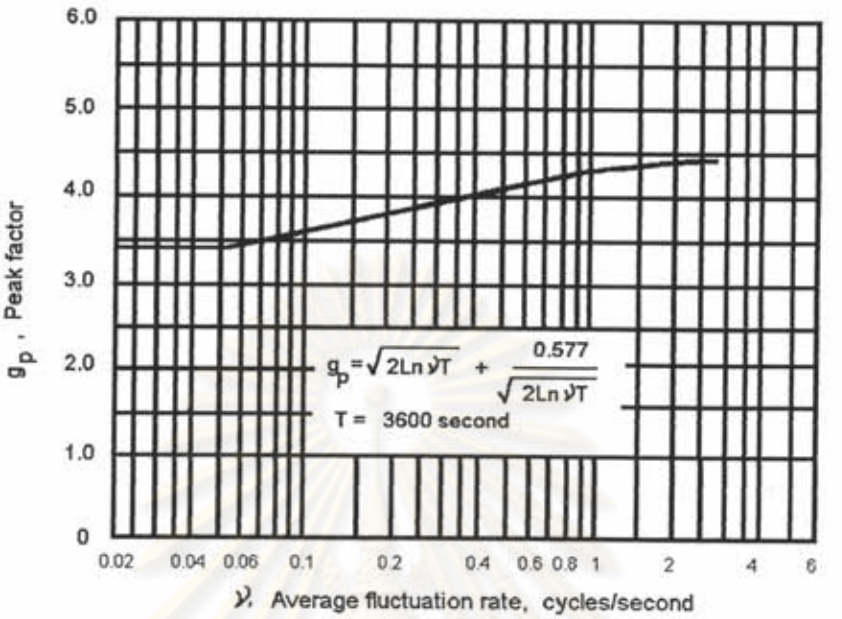
สามารถหาได้จากรูปที่ (2-8) หรือจากสมการ (2-30)

$$g_p = \sqrt{2\,\mathrm{Ln}(\nu T)} + 0.577/\sqrt{2\,\mathrm{Ln}(\nu T)} \qquad (2\text{-}30)$$

เมื่อ T คือ 3600 วินาที

ν คือ Average Fluctuating Rate ประมาณได้โดย

$$\nu = n_o \sqrt{sF/(sF + \beta B)} \qquad (2\text{-}31)$$



รูปที่ (2-8) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบผลการรับแรงสูงสุด, g_p กับค่า Average Fluctation Rate,ν [2]

6) <u>สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดัน (Pressure Coefficient)</u> Cp คือ อัตราส่วนไร้มิติของหน่วยแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากลมบนผิวของอาคาร ต่อแรงดันพลศาสตร์ที่ระดับความสูงอ้างอิง ค่า Cp นี้สามารถหาได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม สำหรับอาคารที่มีรูปร่างในแนวราบเป็นรูปสี่เหลี่ยม เช่นที่แสดงในรูปที่ (2-9) Cp ในด้านปะทะลมมีค่าเท่ากับ 0.8 ที่ทุกระดับความสูง ด้านหลบลม Cp มีค่าเท่ากับ -0.5 ทุกระดับความสูง และด้านข้าง Cp มีค่าเท่ากับ -0.7 ทุกระดับความสูงของอาคาร

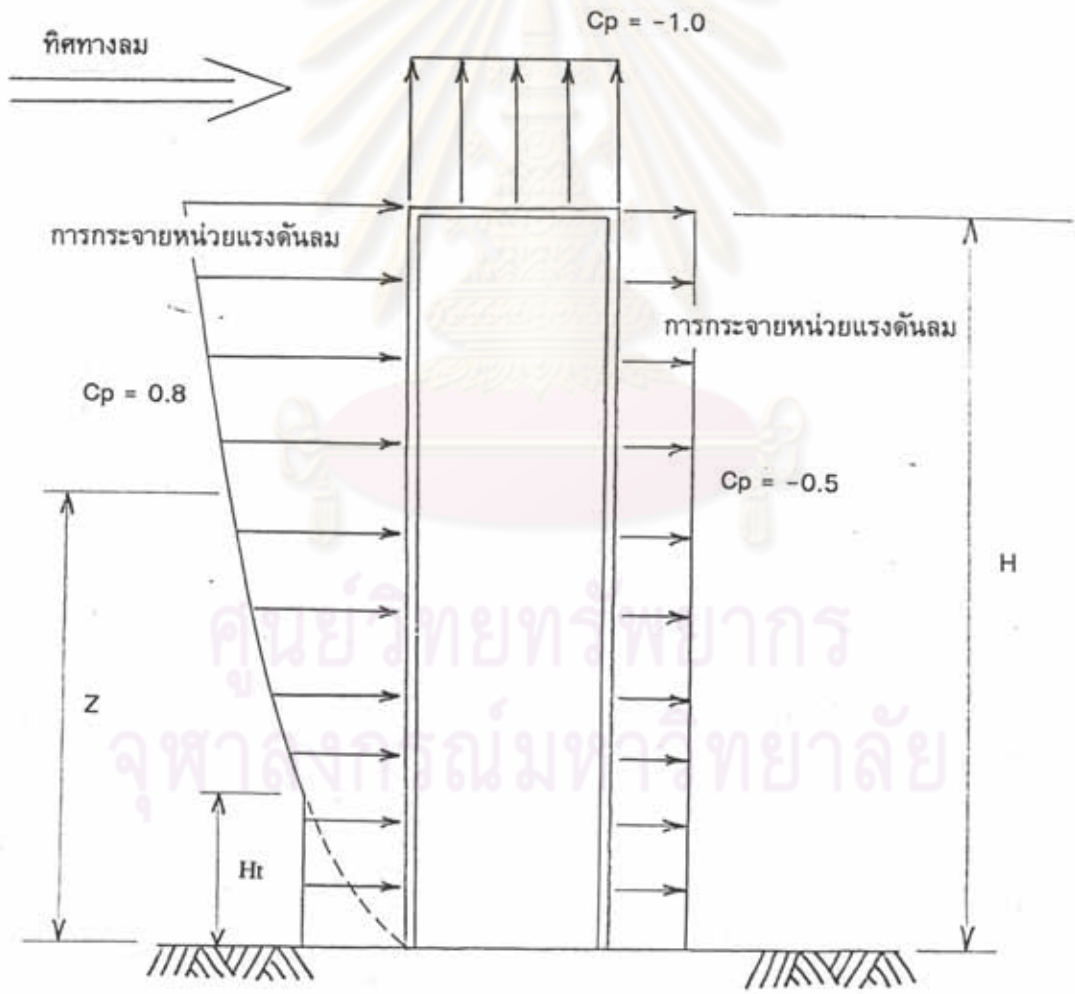
นอกจากนี้ ในรูปที่ (2-9) ยังแสดงรูปการกระจายหน่วยแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารด้วย การกระจายหน่วยแรงลมที่กระทำต่อผนังด้านข้างและด้านหลบลมของอาคาร มีค่า

คงที่ทุกระดับความสูง ความสูงที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงลมของผนังด้านข้างใช้ค่า H และผนังด้านหลบลมใช้ค่า H/2 ส่วนการกระจายหน่วยแรงลมที่กระทำต่ออาคารด้านปะทะลมนั้นได้รับอิทธิพลจากภูมิประเทศที่ลมพัดผ่านมาก่อนปะทะกับอาคาร การคำนวณหน่วยแรงลมที่ระดับความสูงต่างๆ ใช้ความสูง z ใดๆ สำหรับความสูง Ht ในด้านปะทะลมมีค่าแตกต่างกันตามสภาพภูมิประเทศ คือ

Ht = 10 เมตร สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ A

Ht = 12.7 เมตร สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ B

Ht = 30 เมตร สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบ C



รูปที่ (2-9) แสดงค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดัน Cp และแสดงการกระจายหน่วยแรงดันลมที่กระทำต่ออาคารตามระดับความสูง [2]