

## บทที่ 4

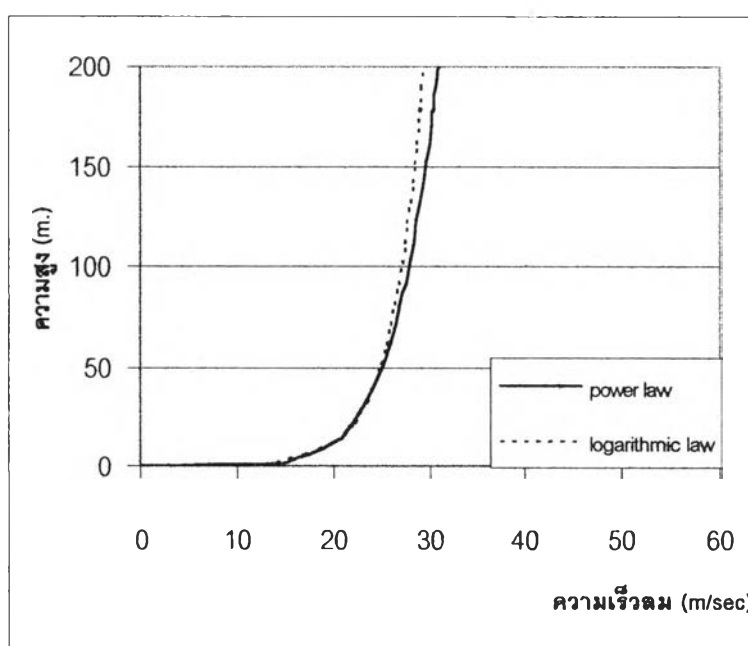
### การพัฒนาวิธีการออกแบบด้านทานแรงลม โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

แรงลมมีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกันไปตามลักษณะของภูมิประเทศ ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบด้านทานแรงลมที่ใช้ในบริเวณพื้นที่ๆแตกต่างจากประเทศไทยอาจไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ออกแบบในประเทศไทยเนื่องจากลักษณะธรรมชาติของแรงที่แตกต่างกัน ในบทนี้จึงเสนอแนะวิธีแรงสถิตเทียบเท่าในการออกแบบด้านทานแรงลมเพื่อใช้ในประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลความเร็วลมที่มีการวัดในประเทศไทย และใช้ข้อมูลของประเทศใกล้เคียงในกรณีที่ยังไม่มีค่าที่วัดได้ในประเทศไทย เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาแรงลม โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

#### 4.1 แรงลมและผลการกรรโชก

จากการวิเคราะห์สมการพื้นฐานของแรงลมดังแสดงในบทที่ 2 พบว่า การหาค่าแรงลมโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรหลายชนิด คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลม และค่าตัวประกอบการกรรโชกของลม ค่าความหนาแน่นของอากาศ เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิต่างกัน ในบริเวณพื้นที่เดียวกัน อุณหภูมิเท่ากัน ค่าความหนาแน่นของอากาศย่อมมีค่าเท่ากัน จึงไม่นำค่าความหนาแน่นของอากาศมาเป็นตัวแปรในงานวิจัยนี้ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง นิยมใช้กันอยู่ 2 สูตร คือ กฎยกกำลัง กับ กฎลอการิทึม ในงานวิจัยนี้เลือกกฎยกกำลังมาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าความเร็วลมออกแบบที่เสนอแนะสำหรับประเทศไทย ที่เสนอโดย นรินทร์ ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมเกรเดียนท์ที่ใช้กฎยกกำลังในการคำนวณ และกฎยกกำลังก็ให้ค่าความเร็วลมสูงกว่ากฎลอการิทึมเล็กน้อย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ความสูงไม่เกิน 200 เมตร ในสภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง ซึ่งเป็นสภาพภูมิประเทศที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ดังนั้นจึงเลือกกฎยกกำลัง ในการหาค่าความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง เพื่อความสอดคล้องในการวิจัย และด้านความปลอดภัยโดยเลือกสูตรที่ให้ค่าความเร็วลมที่สูงกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเป็นค่าที่วัดได้ในอุโมงค์ลม และมีค่าเฉพาะตัวสำหรับรูปร่างของโครงสร้างแต่ละแบบ ในงานวิจัยนี้เลือกวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างต่างๆ ไปที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเป็นค่าคงที่ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.8 สำหรับด้านปะทะลม และ -0.5 สำหรับด้านหลบลม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวเป็นค่าคงที่สำหรับรูปร่างแบบสี่เหลี่ยม จึงไม่นำค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมมา

วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ค่าตัวประกอบการกรรโชก เป็นค่าตัวประกอบที่รวมผลการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง ซึ่งมีลักษณะสเปกตรัมความเร็วลมเข้ามาเกี่ยวข้อง และเนื่องจากสเปกตรัมความเร็วลมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพพื้นที่ จึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกรรโชกควรมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศ ในบทนี้จึงศึกษาค่าตัวประกอบการกรรโชก โดยพิจารณาใช้ค่าสเปกตรัมความเร็วลมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบการกรรโชกให้เหมาะสมกับประเทศไทย ต่อจากนั้นจึงนำค่าตัวประกอบการกรรโชกนั้นมาหาค่าแรงสถิตเทียบเท่า และเปรียบเทียบค่าการตอบสนองของโครงสร้างที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า กับวิธีพลศาสตร์ รวมทั้งหาข้อจำกัดของการใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่า



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้จากกฎยกกำลังกับสูตรลอการิทึมสำหรับสภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง

#### 4.2 ค่าสเปกตรัมความเร็วลมที่นำมาใช้ในการพัฒนาวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

ในการพัฒนาการออกแบบด้านทานแรงลมโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า จำเป็นจะต้องคำนึงถึงลักษณะของความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งอยู่ในรูปของค่าสเปกตรัมความเร็วลม โดยเป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานของลมและลักษณะทางพลศาสตร์ของลม ค่าสเปกตรัมความเร็วลมจึงเป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่จะต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้พัฒนาวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ดังที่กล่าวมาแล้วว่าค่าสเปกตรัมความเร็วลมมีลักษณะที่แตกต่างไปตามสภาพของภูมิประเทศ แต่ในประเทศ

ไทยยังไม่มีมีการวัดข้อมูลค่าสเปกตรัมความเร็วลม จึงเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาวิธีการออกแบบด้านทานแรงลมสำหรับประเทศไทย อย่างไรก็ตามเนื่องจากสภาพธรรมชาติของลมในบริเวณพื้นที่ๆ ใกล้เคียงกันย่อมมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ในงานวิจัยนี้จึงนำค่าสเปกตรัมที่วัดได้ในประเทศใกล้เคียงมาประยุกต์ใช้กับประเทศไทย โดยได้ค่าสเปกตรัมที่วัดได้ในประเทศญี่ปุ่น โดย Hino [5] และค่าสเปกตรัมที่วัดได้ในฮ่องกง โดย Choi [6] มาวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยสมการของ Hino แสดงได้ดังนี้

$$\frac{nS(n)}{\sigma_z^2} = \frac{0.4751}{2} \frac{n/\beta}{\left[1 + (n/\beta)^2\right]^{5/6}} \quad (4.1)$$

$$\beta = 1.169 \times 10^{-2} \frac{\alpha \bar{U}(10)}{10\sqrt{k}} \left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha-1}$$

เมื่อ

$n$  = ความถี่ของลม

$\bar{U}(10)$  = ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง 10 เมตร

$\alpha$  = ค่ายกกำลังที่ใช้ในสูตรยกกำลัง

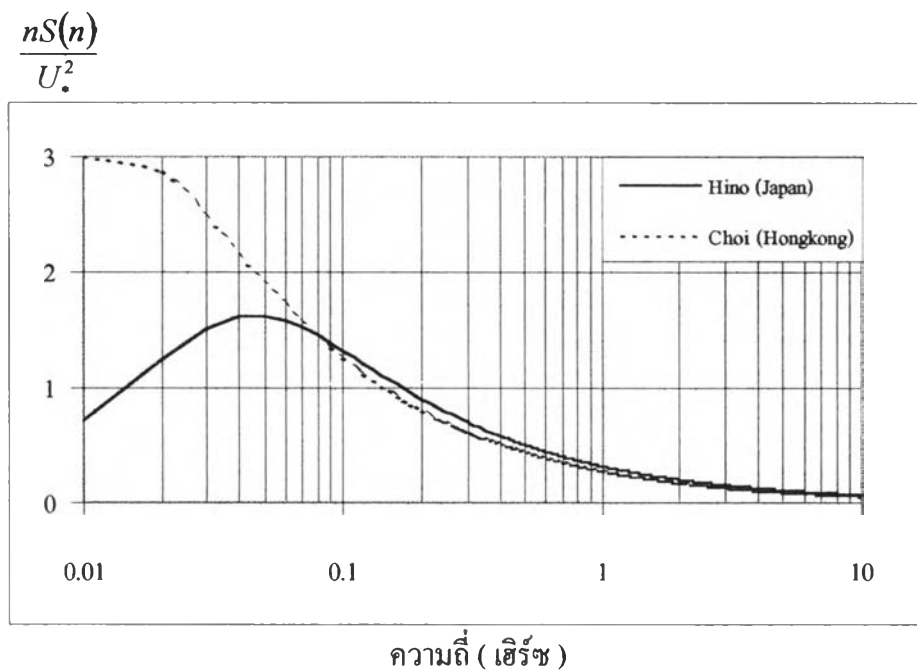
$k$  = สัมประสิทธิ์พื้นผิว (Surface drag coefficient)

และสมการของ Choi แสดงได้ดังนี้

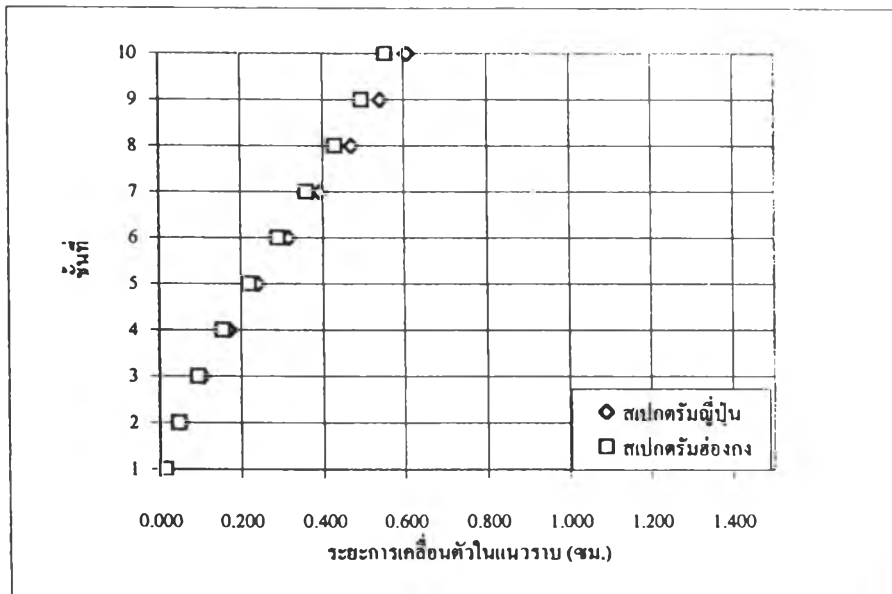
$$\frac{nS(n)}{\sigma_z^2} = \frac{1}{2} \frac{n/0.01}{1 + (n/0.01)^{5/3}} \quad (4.2)$$

โดยเปรียบเทียบทั้งในด้านของค่าของตัวสเปกตรัม และค่าการตอบสนองของอาคารโครงสร้างเมื่อใช้ค่าสเปกตรัมที่วัดได้ในประเทศญี่ปุ่นและฮ่องกงมาใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ว่าให้ค่าการตอบสนองแตกต่างกันอย่างไร เมื่อพิจารณาค่าสเปกตรัมที่ทั้งสองเปรียบเทียบกันดังแสดงอยู่ในกราฟที่ 4.2 พบว่าค่าสเปกตรัมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีค่าความถี่ของลมมากกว่า 0.05 เฮิรซ์ ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่ครอบคลุมค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารโครงสร้างทั่วไป โดยที่ค่าสเปกตรัมของ Hino ที่วัดในประเทศญี่ปุ่นให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย ดังนั้นในเบื้องต้น จึงเลือกใช้ค่าสเปกตรัมของญี่ปุ่นซึ่งให้ค่าสูงกว่ามาใช้ในการพัฒนาวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับประเทศไทย

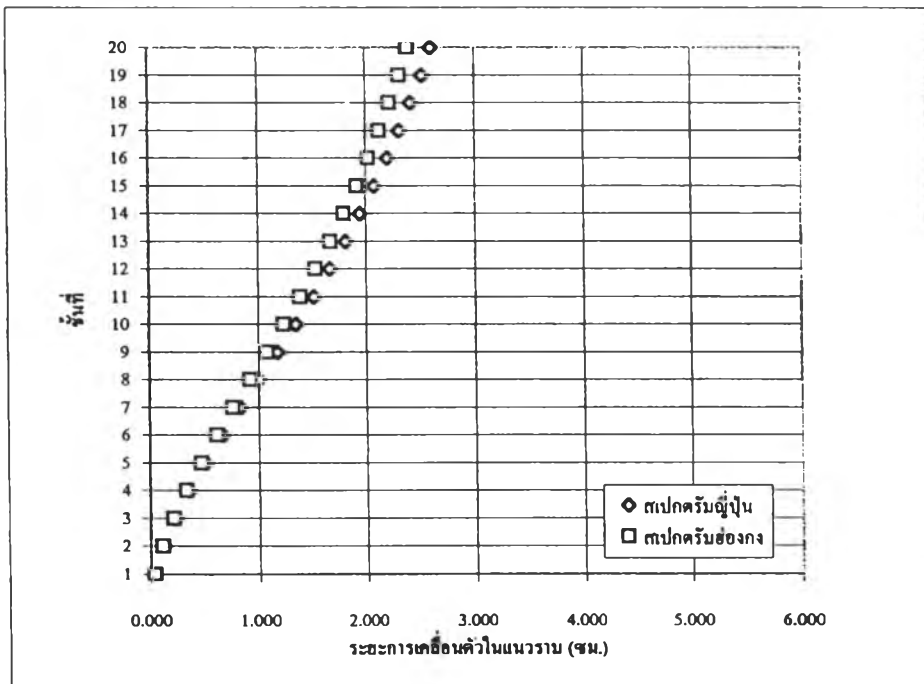
อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ค่าสเปกตรัมของญี่ปุ่นแทนที่จะใช้สเปกตรัมของฮ่องกงด้วยเหตุผลที่ว่า สเปกตรัมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันโดยที่สเปกตรัมของญี่ปุ่นมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เป็นเหตุผลเบื้องต้น จะต้องพิจารณาค่าการตอบสนองของโครงสร้างต่อสเปกตรัมทั้งสองเปรียบเทียบกันโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เพื่อพิจารณาว่าค่าสเปกตรัมทั้งสองให้ค่าการตอบสนองของโครงสร้างใกล้เคียงกันด้วยหรือไม่ โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีพลศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 - 4.6 พบว่า ค่าการตอบสนองของโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นแรงเฉือนที่ฐาน ค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐาน ค่าระยะการเคลื่อนตัวต่างให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยที่โครงสร้างที่รับแรงกระทำเนื่องจากค่าสเปกตรัมของ Hino ให้ค่าการตอบสนองมากกว่าประมาณ 10 % ดังนั้นจึงเลือกสเปกตรัมของ Hino มาใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบการกรร โขก เพื่อใช้ในการหาค่าแรงลม โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า



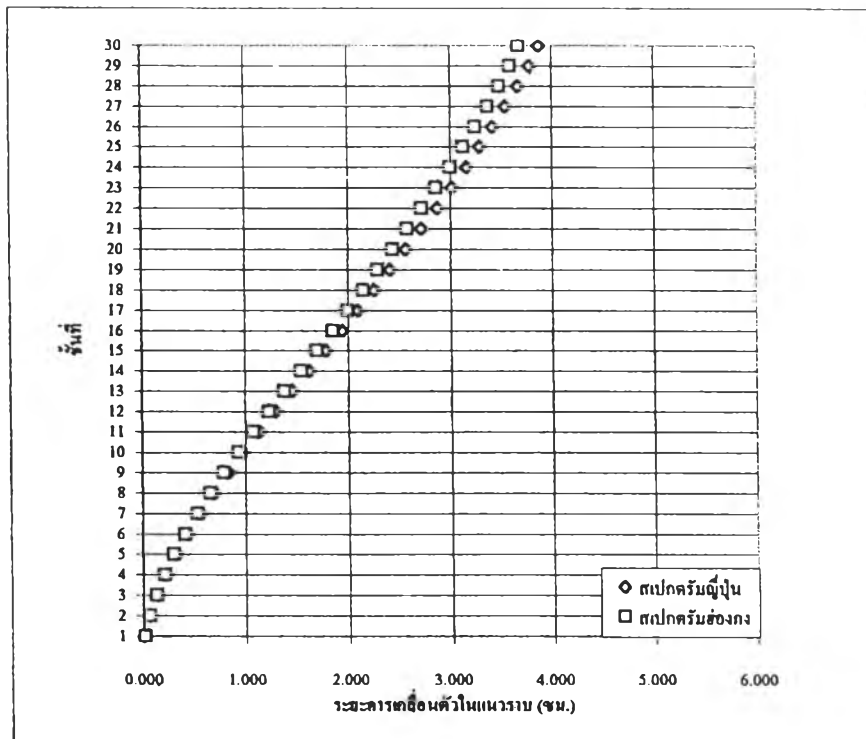
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าสเปกตรัมความเร็วลม



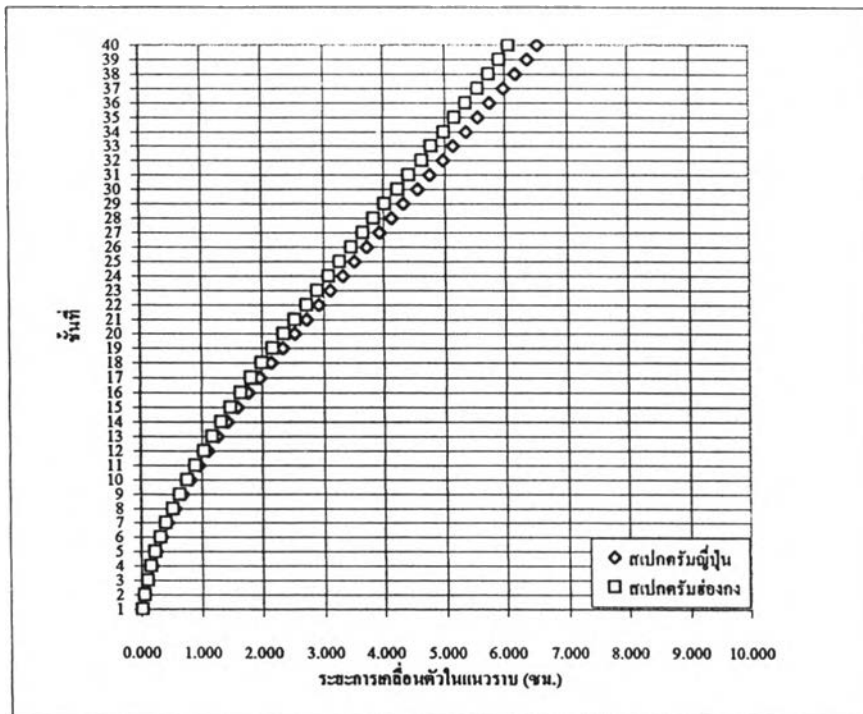
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยสเปกตรัมของญี่ปุ่น กับสเปกตรัมของฮ่องกง สำหรับโครงสร้าง 10 ชั้น



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของ โครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยสเปกตรัมของญี่ปุ่น กับสเปกตรัมของฮ่องกง สำหรับโครงสร้าง 20 ชั้น



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยสเปกตรัมของญี่ปุ่น  
กับสเปกตรัมของฮ่องกง สำหรับโครงสร้าง 30 ชั้น



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยสเปกตรัมของญี่ปุ่น กับสเปกตรัมของฮ่องกง สำหรับโครงสร้าง 40 ชั้น



### 4.3 การพัฒนาค่าตัวประกอบการกรรโชก

การคำนวณหาแรงลมมีพื้นฐานมาจากการพิจารณาแปลงค่าความเร็วลมมาเป็นค่าแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างโดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงลมกับความเร็วลมดังแสดงในสมการของเบอร์นูลี ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$P = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (4.3)$$

เมื่อ

$$P = \text{ความดันเนื่องจาก แรงลม} \quad \text{kg/m}^2$$

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของอากาศ} \quad \text{kg/m}^3$$

$$U = \text{ความเร็วลม} \quad \text{m/sec}$$

ค่าความเร็วลมดังกล่าวเป็นค่าความเร็วลมขณะใดขณะหนึ่งที่ปะทะกับ โครงสร้างอาคาร แต่เนื่องจากค่าความเร็วลมเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา การออกแบบด้านทานแรงลมโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าจึงพยายามทำให้การวิเคราะห์หาค่าแรงลมง่ายขึ้น โดยการคำนวณหาค่าแรงลมจากค่าความเร็วลมเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่ และเสนอค่าตัวประกอบเป็นตัวคูณเข้ากับค่าแรงลมซึ่งเรียกว่าค่าตัวประกอบการกรรโชก ( $G$ ) ดังแสดงในสมการที่ 4.4

$$P = \frac{1}{2} \rho G \bar{U}^2 \quad (4.4)$$

ค่าตัวประกอบการกรรโชกเป็นค่าตัวประกอบที่รวมผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้างอาคารต่อแรงลม โดยพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ของความเร็วลมแต่ละตำแหน่งที่ปะทะกับตัวอาคาร ความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่ด้านปะทะลม กับด้านหลบลมของตัวอาคาร การสมมติรูปแบบของโครงสร้าง ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูงระดับต่างๆ ค่าสเปกตรัมของความเร็วลม เป็นต้น โดยมีพื้นฐานในการคำนวณหาตัวประกอบการกรรโชกมาจากการพิจารณา ระยะเวลาเคลื่อนตัวตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงลมซึ่งประกอบไปด้วยค่าระยะเวลาเคลื่อนตัวเฉลี่ยอันเนื่องมาจากแรงลมเฉลี่ยกับระยะเวลาเคลื่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าเฉลี่ยเนื่องจากความแปรปรวนของแรงลม โดยที่ระยะเวลาเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้างตามทิศทางของลม ที่ระดับความสูง  $z$  ใดๆสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y_{\max}(z) = \bar{Y}(z) + y_{\max}(z) \quad (4.5)$$

โดยที่

$Y_{\max}(z)$  = ค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างที่ระดับความสูง  $z$  ใดๆ

$\bar{Y}(z)$  = ค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองเฉลี่ยของโครงสร้างที่ความสูง  $z$  ใดๆ

$y_{\max}(z)$  = ค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ยที่ระดับความสูง  $z$  ใดๆ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ  $Y_{\max}(z)$   $\bar{Y}(z)$   $y_{\max}(z)$  ได้ว่า

$$Y_{\max}(z) = \bar{Y}(z) + g \sigma(z) \quad (4.6)$$

เมื่อ

$g$  = ค่าตัวประกอบสูงสุด ( Peak Factor )

$$= \sqrt{2 \ln vT} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln vT}}$$

โดยที่

$v$  = Average Fluctuating Rate หาได้จากสมการที่ (4.40)

$T_1$  = ช่วงเวลาที่ใช้ในการเฉลี่ยค่าความเร็วลม = 3600 วินาที

$\sigma(z)$  = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนตัวที่ระดับความสูง  $z$

สัดส่วนของการเคลื่อนตัวตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างกับค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองเฉลี่ยของโครงสร้างแสดงได้ดังนี้

$$\frac{Y_{\max}(z)}{\bar{Y}(z)} = 1 + \frac{g \sigma(z)}{\bar{Y}(z)} \quad (4.7)$$

ค่าทางด้านขวาของสมการที่ (4.7) คือค่าตัวประกอบการกรรโชก และกำหนดให้แทนด้วย  $G$  ดังนั้นเขียนสมการที่ (4.7) ใหม่ได้ดังนี้

$$G = 1 + \frac{g \sigma(z)}{\bar{Y}(z)} \quad (4.8)$$

ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวคอบสนองสูงสุดสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$Y_{\max}(z) = G(z) \bar{Y}(z) \quad (4.9)$$

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสามารถเขียนในรูปของความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวน กับค่าสเปกตรัมคอบสนองของการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ดังนี้

$$\sigma_y^2 = \int_0^{\infty} S_y(z, n) dn \quad (4.10)$$

เมื่อ

$S_y(z, n)$  = สเปกตรัมคอบสนองของการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง

$$S_y(z, n) = \frac{|H(n)|^2}{k^2} S_p(z, n) \quad (4.11)$$

โดยที่

$$|H(n)|^2 = \frac{1}{k^2} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{n}{n_0}\right)^2} \quad (4.12)$$

$k$  = สติฟเนสของโครงสร้าง

$n_0$  = ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง Hz

$n$  = ความถี่ของลม Hz

$\xi$  = อัตราความหน่วงของโครงสร้าง

แทนสมการที่ (4.10) (4.11) ลงในสมการที่ (4.8)

$$G = 1 + \frac{g \sqrt{\int_0^{\infty} |H(n)|^2 S_p(z, n) dn}}{k \bar{Y}} \quad (4.13)$$

จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \bar{P} &= k \bar{Y} \\ \bar{Y} &= \frac{\bar{P}}{k} \end{aligned} \quad (4.14)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \text{แรงที่กระทำเฉลี่ยต่อโครงสร้าง} \\ \bar{Y} &= \text{การเคลื่อนตัวเฉลี่ยของโครงสร้าง} \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการตัวประกอบการกรรโชกได้ใหม่ดังนี้

$$G = 1 + g \frac{\sqrt{\int_0^{\infty} |H(n)|^2 S_p(z, n) dn}}{\bar{P}} \quad (4.15)$$

จากคุณสมบัติของฟังก์ชัน  $|H(n)|^2$  ค่า  $|H(n)|^2$  จะมีค่าประมาณเท่ากับ 1 สำหรับช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 จนเกือบถึง  $n_0$  และจะมีค่าสูงมาก เมื่อ  $n$  มีค่าเท่ากับ  $n_0$  (คือค่าความถี่ธรรมชาติ) ดังนั้นค่าอินทิกรัลในสมการที่ (4.15) จะประกอบไปด้วย ส่วนที่ไม่มีการสั่นพ้อง ( Non Resonant Part ) ดังสมการที่ 4.16 กับส่วนที่มีการสั่นพ้อง ( Resonant Part ) ดังสมการที่ 4.17 โดยเครื่องหมายภายใต้รากที่สอง  $\int_0^{\infty} |H(n)|^2 S_p(z, n) dn = B + R$  โดยที่

$$B = \int_0^{\infty} S_p(z, n) dn \quad (4.16)$$

$$R = \frac{\pi n_0}{4\xi} S_p(z, n_0) \quad (4.17)$$

สามารถเขียนสมการที่ (4.15) ได้ใหม่ดังนี้

$$G = 1 + g \frac{\sqrt{\int_0^{\infty} S_p(z, n) dn + \frac{\pi n_0}{4\xi} S_p(z, n_0)}}{\bar{P}} \quad (4.18)$$

จากสมการที่ (4.18) ค่าตัวประกอบการกรรโชก ขึ้นอยู่กับค่า  $S_p(z, n)$  คือค่าสเปกตรัมของหน่วยแรงลม สมมติให้รูปแบบของโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรง (Line - like Structure) และเสนอสมการ  $S_p(z, n)$  ดังนี้

$$S_p(z, n) = 4 \frac{\bar{P}^2(H)}{\bar{U}^2(H)} |J_z(n)|^2 |J_H(n)|^2 S_u(z, n) \quad (4.19)$$

โดยที่

$$S_p(z, n) = \text{สเปกตรัมของหน่วยแรงลม}$$

$$\bar{P}(H) = \text{ความดันของลมที่กระทำกับโครงสร้างที่ชั้นบนสุดของอาคาร (ที่ความสูง H)}$$

$$\bar{U}(H) = \text{ความเร็วลมที่ตำแหน่งความสูง H}$$

ค่า  $|J_z(n)|^2$  และ  $|J_H(n)|^2$  ในสมการที่ (4.17) คือค่า Joint Acceptance ในแนวตั้ง และค่า Joint Acceptance ในแนวราบในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของแรงลมที่กระทำกับอาคาร ตามลำดับ มีสูตรดังนี้

$$|J_z(n)|^2 = 3 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left[ \frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}_1} \right] \left[ \frac{\bar{U}(z_1)}{\bar{U}_1} \right] z z_1 e^{-c|z-z_1|} dz dz_1 \quad (4.20)$$

$$|J_H(n)|^2 = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-c|z-z_1|} dz dz_1 \quad (4.21)$$

จากผลของการทดลอง Davenport [11] เสนอค่าประมาณของ  $c$  ดังนี้

$$c = \frac{8Hn}{\bar{U}} \quad (4.22)$$

และค่าประมาณของ  $|J_z(n)|^2$  และ  $|J_H(n)|^2$  มีค่าดังนี้

$$|J_z(n)|^2 = \frac{1}{(1+\alpha)^2} \frac{1}{1+\frac{c}{3}} \quad (4.23)$$

$$|J_H(n)|^2 = \frac{1}{1+\frac{c_1}{2}} \quad (4.24)$$

โดยที่

$$c_1 = 20 \frac{Hn b}{\bar{U} H} \quad (4.25)$$

เมื่อ

$b$  = ระยะด้านกว้างของอาคาร                      m.

กำหนดให้ความดันของลมที่ความสูง  $z$  ใดๆ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\bar{P}(z) = \bar{P}(H) z^{2\alpha} \quad (4.26)$$

กำหนดให้การเคลื่อนตัวในโหมดที่ 1 ของโครงสร้างเป็น

$$\mu(z) = \sqrt{3}z \quad (4.27)$$

จากรูปร่างการเคลื่อนตัวในโหมดที่ 1 และค่าความดันที่ความสูงใดๆ ดังแสดงในสมการที่ (4.26) สามารถเขียนสมการความดันเฉลี่ยของลมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \int_0^1 \bar{P}(z) \mu(z) dz \\ &= \sqrt{3} \bar{P}(H) \int_0^1 z^{1+2\alpha} dz \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2(1+\alpha)} \bar{P}(H) \end{aligned} \quad (4.28)$$

แทนค่า  $S_p(n)$  ในสมการที่ (4.19) ลงในสมการที่ (4.18) ดังนั้นสมการค่าตัวประกอบการกรรโชกสามารถแสดงได้ดังนี้

$$G = 1+g \left[ \bar{P}^{-2} \left\{ \int_0^{\infty} 4 \frac{\bar{P}^2(H)}{\bar{U}^2(H)} |J_z(n)|^2 |J_H(n)|^2 S(n) dn + \frac{m_0}{4\xi} 4 \frac{\bar{P}^2(H)}{\bar{U}^2(H)} |J_z(n)|^2 |J_H(n)|^2 S(n) dn \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

.....(4.29)

แทนสมการที่ (4.28) ลงในสมการที่ (4.29)

$$G = 1+g \left[ \frac{4(1+\alpha)^2}{3\bar{P}^2(H)} \left\{ \int_0^{\infty} 4 \frac{\bar{P}^2(H)}{\bar{U}^2(H)} |J_z(n)|^2 |J_H(n)|^2 S(n) dn + \frac{m_0}{4\xi} 4 \frac{\bar{P}^2(H)}{\bar{U}^2(H)} |J_z(n)|^2 |J_H(n)|^2 S(n) dn \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

.....(4.30)

ค่าสมการข้างบนเป็นสมการในการหาค่าตัวประกอบการกรร โซกซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสเปกตรัมความเร็วลม โดยเลือกใช้สมการสเปกตรัมของความเร็วลมที่วัดได้ในประเทศญี่ปุ่นที่เสนอโดย Hino [5] นำมาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาค่าตัวประกอบการกรร โซก โดยแสดงสมการสเปกตรัมได้ดังนี้

$$\frac{nS(n)}{\sigma_z^2} = \frac{0.4751}{2} \frac{n/\beta}{[1+(n/\beta)^2]^{\frac{5}{6}}}$$

(4.31)

$$\beta = 1.169 \times 10^{-2} \frac{\alpha \bar{U}(10)}{10\sqrt{k}} \left( \frac{z}{10} \right)^{2\alpha-1}$$

กำหนดให้

$$x = \frac{n}{\beta}$$

$$= \frac{n}{\bar{U}(10)} \frac{10\sqrt{k}}{1.169 \times 10^{-2} \alpha} \left( \frac{z}{10} \right)^{1-2\alpha}$$

(4.32)

กำหนดให้  $Z = \frac{H}{2}$  และ

$$J = \frac{10\sqrt{k}}{1.169 \times 10^{-2} \alpha} \left(\frac{H}{20}\right)^{1-2\alpha} \quad (4.33)$$

ดังนั้น

$$x = \frac{nJ}{\bar{U}(10)} \quad (4.34)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในสมการที่ (4.31) มีความสัมพันธ์กับค่าสเปกตรัมของความเร็วลม  
ดังนี้

$$\sigma_z^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_u(z,n) dn = 2 \int_0^{\infty} S_u(z,n) dn \quad (4.35)$$

และ

$$\int_0^{\infty} S_u(z,n) \equiv 6U_*^2 \quad (4.36)$$

ดังนั้นสมการสเปกตรัมสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{nS(n)}{U_*^2} = 2.85 \frac{n/\beta}{\left[1 + (n/\beta)^2\right]^{5/6}} \quad (4.37)$$

หรือ

$$\frac{nS(n)}{U_*^2} = 2.85 \frac{x}{\left[1 + x^2\right]^{5/6}} \quad (4.38)$$

แทนสมการที่ (4.23) สมการที่ (4.24) สมการที่ (4.31) ลงในสมการที่ (4.30) และจัดรูปได้ดัง

$$G = 1 + g \left[ \frac{k}{\frac{1}{4} \left(\frac{H}{z_0}\right)^{2\alpha}} \left\{ \frac{2.85^{3J/4H}}{3} \int_0^{\frac{1}{1 + \frac{8xH}{3J} + 10 \frac{xb}{J}}} \frac{1}{\left[1 + x^2\right]^{5/6}} dx + \frac{1}{\xi} \frac{\pi}{3} \frac{1}{1 + \frac{8n_0 H}{3\bar{U}(H)}} \frac{1}{1 + \frac{10n_0 b}{\bar{U}(H)}} \frac{2.85}{4} \left[ \frac{x_0}{\left[1 + x_0^2\right]^{5/6}} \right] \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots(4.39)$$

หรือ



$$G = 1 + gr \sqrt{B + \frac{sF}{\zeta}} \quad (4.40)$$

โดยที่

$$B = \frac{2.85}{3} \int_0^{3J/4H} \frac{1}{1 + \frac{8xH}{3J}} \frac{1}{1 + 10\frac{xb}{J}} \left[ \frac{1}{(1+x^2)^{\frac{5}{6}}} \right] dx$$

หรือหาได้จากกราฟรูปที่ 4.7

$$s = \frac{\pi}{3} \frac{1}{1 + \frac{8n_0H}{3\bar{U}(H)}} \frac{1}{1 + \frac{10n_0B}{\bar{U}(H)}}$$

หรือหาได้จากกราฟรูปที่ 4.8

$$F = \frac{2.85}{4} \left[ \frac{x_0}{(1+x_0^2)^{\frac{5}{6}}} \right]$$

หรือหาได้จากกราฟรูปที่ 4.9

$$r = \frac{\sqrt{k}}{\frac{1}{4} \left( \frac{H}{30} \right)^\alpha}$$

$$g = \sqrt{2 \ln v T_1} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln v T_1}}$$

และ

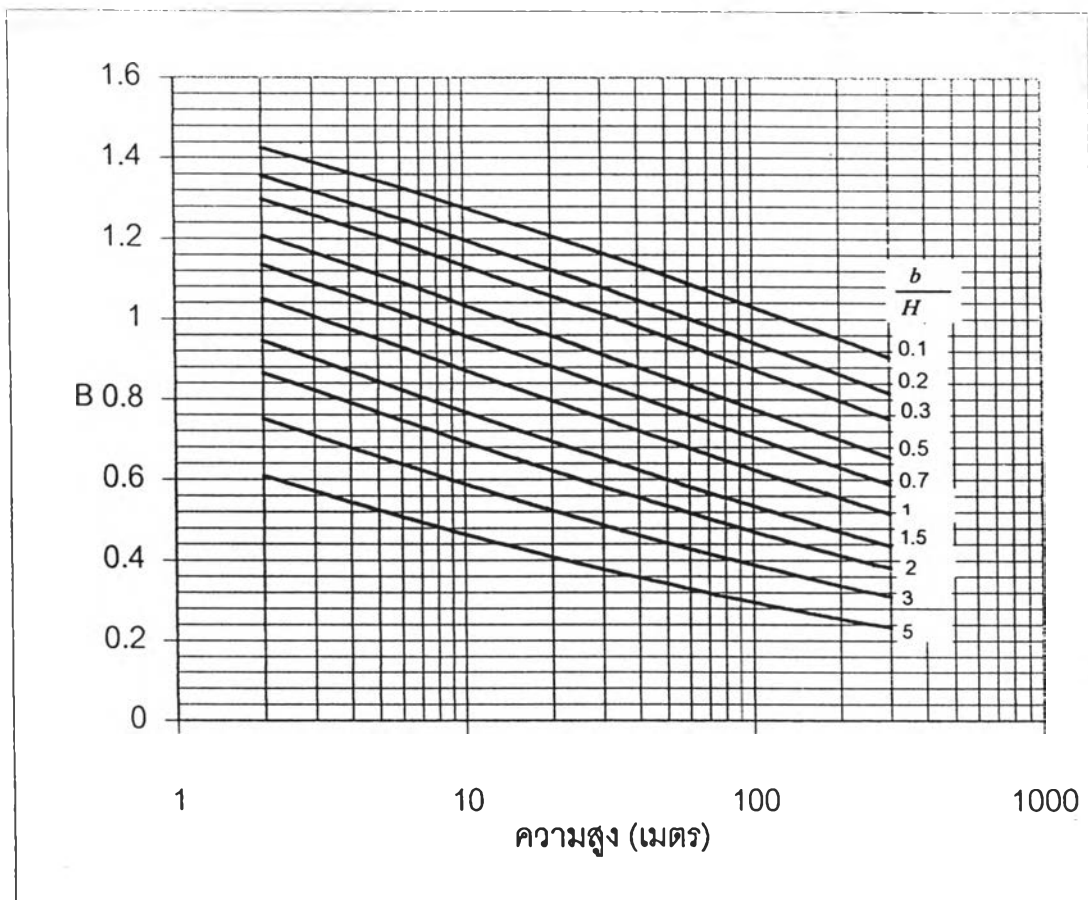
$v$  = Average Fluctuating Rate ประมาณได้โดย

$$v = n_0 \sqrt{\frac{sF}{(sF + \zeta B)}}$$

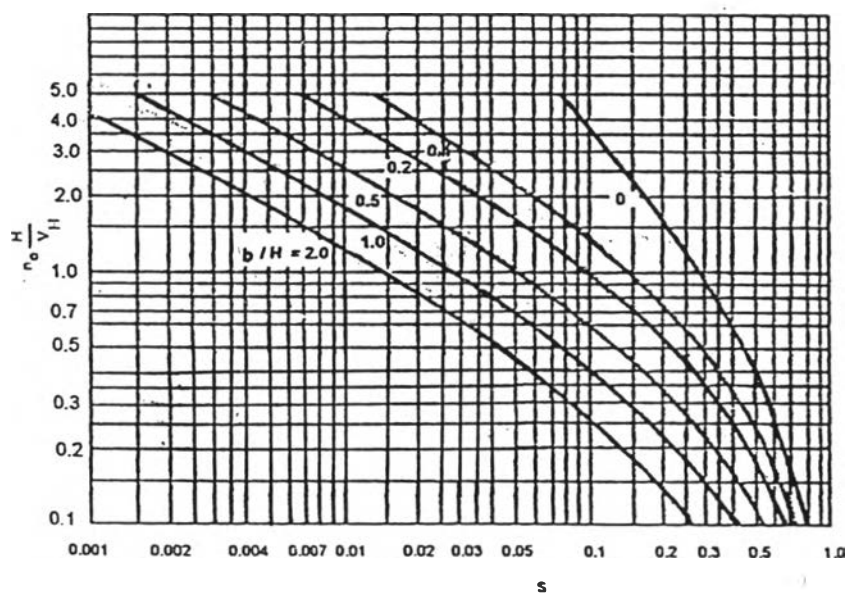
$T_1$  = ช่วงเวลาที่ใช้ในการเฉลี่ยค่าความเร็วลม = 3600 วินาที

$\zeta$  = อัตราส่วนความหน่วง

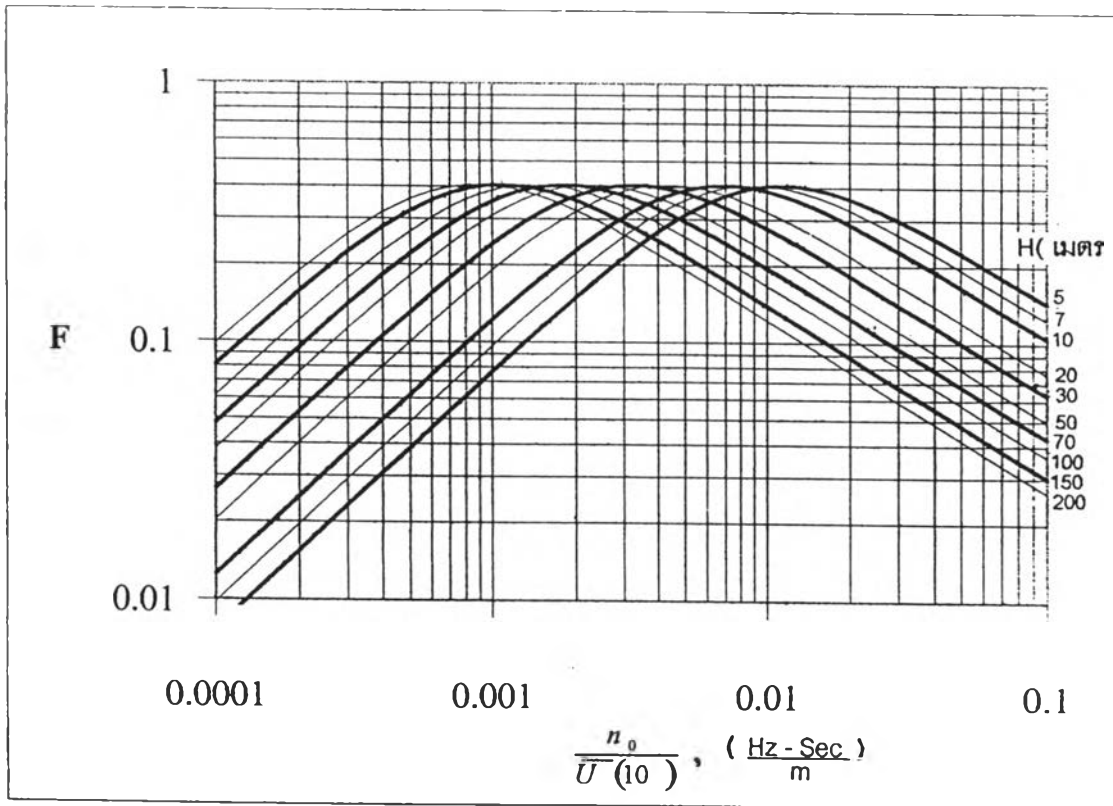
การออกแบบโดยวิธีแรงสถิติเทียบเท่าสำหรับแรงลม สามารถเขียนอยู่ในรูปของแผนภูมิ  
 ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าตัวประกอบ B



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าตัวประกอบ  $s$



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าตัวประกอบ F

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์

ค่าสเปกตรัมแรงลมที่วัดได้ในประเทศญี่ปุ่นซึ่งเสนอเป็นสูตรโดย Hino กับที่คำนวณได้จากสเปกตรัมแรงลมที่วัดในฮ่องกงซึ่งเสนอโดย Choi มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความถี่ของลมมีค่ามากกว่า 0.05 เฮิรซ์ ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างอาคารต่างๆไป โดยที่ค่าสเปกตรัมของญี่ปุ่นให้ค่าที่สูงกว่าสเปกตรัมของฮ่องกงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์เพื่อหาค่าการตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงกระทำสองแบบ โดยใช้สเปกตรัมของญี่ปุ่นกับสเปกตรัมของฮ่องกง พบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ฐานและค่าการเคลื่อนตัวตองสนองที่ชั้นบนสุดที่ได้จากสูตรสเปกตรัมแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 - 4.6 ญี่ปุ่นและฮ่องกงตั้งอยู่ในภูมิภาคเดียวกัน จึงอาจจะกล่าวได้ว่าในแถบภูมิภาคเดียวกันค่าสเปกตรัมของลมจะไม่แตกต่างกันมากนัก ประเทศไทยอยู่ในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง กับญี่ปุ่น และฮ่องกง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่าสเปกตรัมที่วัดได้ในประเทศญี่ปุ่นมาใช้ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์และวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับประเทศไทย โดยคำนึงถึงผลในด้านของความปลอดภัย เนื่องจากสเปกตรัมของญี่ปุ่นให้ค่าที่สูงกว่า

จากการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ในการหาค่าตัวประกอบการกรรโชก (Gust Factor) ในหัวข้อที่ 4.3 พบว่าค่าคาบของโครงสร้างมีผลต่อการคำนวณหาค่าตัวประกอบการกรรโชก ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่าแรงลมสถิตเทียบเท่าต่อไป การประมาณค่าคาบของโครงสร้างตามความสัมพันธ์ที่เสนอในบทที่ 3 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ย่อมส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกรรโชกมีค่าคลาดเคลื่อนไปด้วย แต่จากการทดสอบหาค่าตัวประกอบการกรรโชกโดยที่ค่าคาบของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกรรโชกมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.052 % เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงว่าสูตรการประมาณค่าคาบดังกล่าวสามารถนำมาใช้ได้

พิจารณาค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ เปรียบเทียบกับวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่ได้จากการปรับปรุงค่าตัวประกอบการกรรโชก พบว่าค่าแรงเฉือนที่ฐานจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าสูงกว่าค่าแรงเฉือนที่ฐานที่ได้จากวิธีพลศาสตร์อยู่ในช่วง 8 - 12 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโครงสร้าง 10 - 40 ชั้น ที่นำมาวิเคราะห์ แสดงว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าที่ปลอดภัยในด้านการพิจารณาค่าแรงเฉือนที่ฐาน

พิจารณาค่าโมเมนต์พลิกคว่ำ (Overturning Moment) ที่ฐานโครงสร้าง เปรียบเทียบระหว่างวิธีพลศาสตร์กับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า พบว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าโมเมนต์ที่ฐานของโครงสร้างน้อยกว่าวิธีพลศาสตร์ อยู่ในช่วง 4 - 9 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโครงสร้าง 10 - 30 ชั้น แต่จากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ที่ฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ เทียบกับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$X_{static} = \bar{X} + \lambda \sigma \quad (4.41)$$

เมื่อ

- $X_{static}$  = ค่าการตอบสนองของโครงสร้างที่คำนวณได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า  
 $\bar{X}$  = ค่าการตอบสนองเฉลี่ยของโครงสร้างที่คำนวณโดยวิธีพลศาสตร์  
 $\lambda$  = ตัวคูณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 $\sigma$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการตอบสนองของโครงสร้างที่ได้จาก  
 คำนวณโดยวิธีพลศาสตร์

พบว่าสำหรับโครงสร้าง 10 ชั้น, 20 ชั้น และ 30 ชั้น มีค่า  $\lambda$  อยู่ในช่วง 3.95 – 6.48 และเนื่องจากลักษณะการกระจายของข้อมูลเนื่องจากแรงลมมีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) ค่า  $\lambda$  ที่น้อยที่สุดมีค่า 3.95 จะได้ค่าความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานโดยวิธีพลศาสตร์มีค่าสูงกว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่าเป็น  $10^{-4}$  แสดงว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่าดังกล่าวมีความปลอดภัยในการนำไปใช้เมื่อพิจารณาในด้านของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานสำหรับโครงสร้าง 10 – 30 ชั้น แต่สำหรับโครงสร้าง 40 ชั้น ค่าโมเมนต์ที่ฐานของโครงสร้างที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้น้อยกว่าวิธีพลศาสตร์ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสำหรับโครงสร้าง 40 ชั้น ความสูง 168 เมตร อาจไม่เหมาะที่จะออกแบบต้านทานแรงลมโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าเมื่อพิจารณาในด้านของโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานของโครงสร้าง

พิจารณาค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง เปรียบเทียบระหว่างวิธีพลศาสตร์กับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากวิธีพลศาสตร์อยู่ในช่วง 12 – 19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง แต่จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าโครงสร้างทั้ง 4 แบบ ให้ค่า  $\lambda$  อยู่ในช่วง 3.0 – 3.62 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของการออกแบบโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่ Davenport [11] เสนอไว้ว่าค่า  $\lambda$  ควรมีค่าอยู่ในช่วง 3 - 5 และมีค่าความน่าจะเป็นที่การเคลื่อนตัวต่างตอบสนองจากวิธีพลศาสตร์มากกว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่ายังคงให้ความปลอดภัยในการนำไปใช้

ดังนั้นวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับแรงลมที่เสนอแนะ โดยการปรับแก้ค่าตัวประกอบการกรรโชก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ ให้ความปลอดภัยเพียงพอในการนำไปใช้สำหรับโครงสร้าง 10 ชั้น, 20 ชั้น และ 30 ชั้น ที่มีความสูง 32 เมตร, 64 เมตร และ 96 เมตรตามลำดับ แต่สำหรับโครงสร้าง 40 ชั้นที่มีความสูง 168 เมตรที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้พบว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่าโมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานน้อยกว่าวิธีพลศาสตร์ค่อนข้างมากจึงอาจไม่ปลอดภัยในการออกแบบกับอาคารที่มีความสูงขนาดนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบการกรรโทษเมื่อคาบเปลี่ยนไป

จำนวนชั้น	คาบ (วินาที)	ค่าคาบที่เปลี่ยนแปลง	ค่าตัวประกอบการกรรโทษ	ค่าตัวประกอบการกรรโทษ ที่เปลี่ยนแปลง
10	1.130	0%	1.72866	0.000%
	1.243	10%	1.7286	-0.003%
20	1.900	0%	1.71029	0.000%
	2.090	10%	1.71009	-0.012%
30	2.780	0%	1.63533	0.000%
	3.058	10%	1.63487	-0.028%
40	4.47	0	1.57151	0%
	4.917	10%	1.57071	-0.051%

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงเดือนตอบสนองสูงสุดพื้นฐานของ โครงสร้าง

ลักษณะของโครงสร้าง	คาบของโครงสร้าง (วินาที)	แรงเดือนตอบสนองสูงสุดพื้นฐาน (ตัน)		เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง เทียบกับวิธี พลศาสตร์	ข้อมูลทางสถิติของค่าบวมเดือนสูงสุดพื้นฐานจากการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์		
		วิธีพลศาสตร์	วิธีแรงสถิตเทียบเท่าเสมอแนะ		$\bar{x}$	$\sigma$	$\lambda$ (เมื่อ $X_{static} = \bar{x} + \lambda\sigma$ )
คสล. 10 ชั้น	1.130	9.29	10.40	12%	4.3455	0.9727	6.23
คสล. 20 ชั้น	1.900	39.18	42.29	8%	21.0000	3.0727	6.93
คสล. 30 ชั้น	2.780	53.36	57.66	8%	28.8864	4.7227	6.09
คสล. 40 ชั้น	4.470	123.94	135.56	9%	66.8136	12.54	5.48



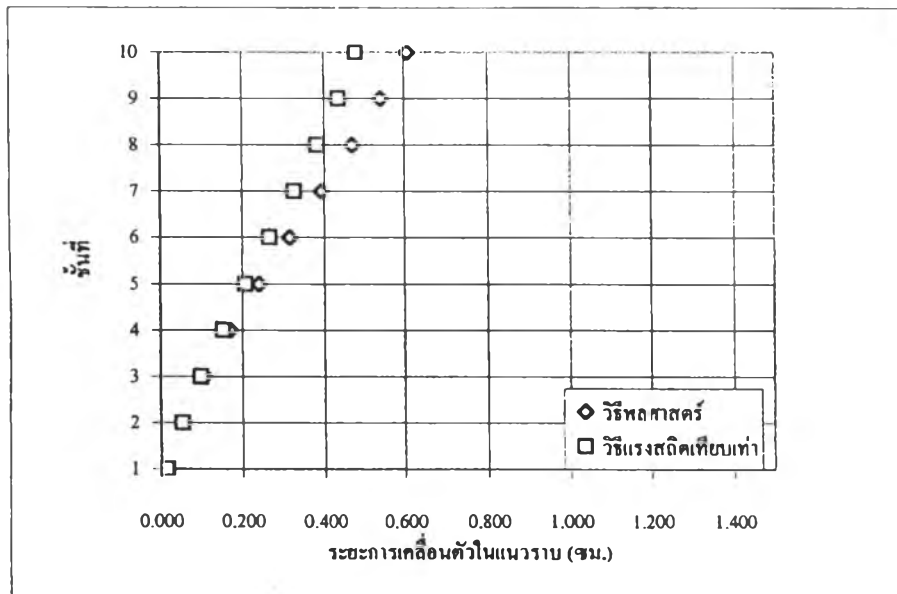
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าโมเมนต์พื้นฐานของโครงสร้าง

ลักษณะของโครงสร้าง	คาบของโครงสร้าง (วินาที)	โมเมนต์พื้นฐานของโครงสร้าง (คาน-เมตร)		เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง เทียบกับวิธี พหุศาสตร์	ข้อมูลทางสถิติของค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ฐานจากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีพหุศาสตร์		
		วิธีพหุศาสตร์	วิธีแรงสถิตเทียบเท่าแน่นอน		$\bar{X}$	$\sigma$	$\lambda$ (เมื่อ $X_{static} = \bar{X} + \lambda\sigma$ )
คสล 10 ชั้น	1.130	193.41	185.74	-4%	102.23	12.88	6.48
คสล 20 ชั้น	1.900	1603.41	1512.58	-6%	953.00	139.53	4.01
คสล 30 ชั้น	2.780	3388.64	3098.08	-9%	1952.64	290.13	3.95
คสล 40 ชั้น	4.470	16073.86	12789.57	-20%	8141.27	1528.05	3.04

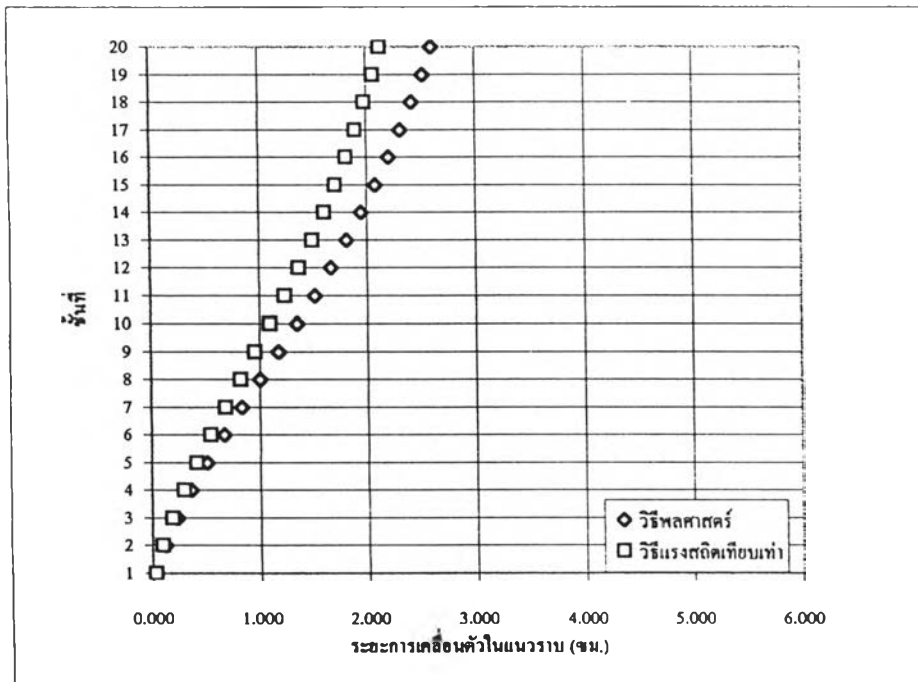
ตารางที่ 4.4 แสดงระยะการเคลื่อนตัวคอบสนองที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง

ลักษณะของโครงสร้าง	คาบของโครงสร้าง (วินาที)	ระยะการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุด ( ซม. )		เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง เทียบกับวิธี พหุศาสตร์	ข้อมูลทางสถิติของค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ฐานจากการวิเคราะห์โดยวิธีพหุศาสตร์		
		วิธีพหุศาสตร์	วิธีแรงสถิตเทียบเท่าเสมอแนะ		$\bar{x}$	$\sigma$	$\lambda$ (เมื่อ $X_{static} = \bar{x} + \lambda\sigma$ )
คตล. 10 ชั้น	1.130	0.61	0.49	-19%	0.2953	0.0660	3.00
คตล. 20 ชั้น	1.900	2.60	2.13	-18%	1.3920	0.2038	3.60
คตล. 30 ชั้น	2.780	3.88	3.34	-14%	2.0990	0.3430	3.62
คตล. 40 ชั้น	4.470	6.33	5.54	-12%	3.5175	0.6604	3.06

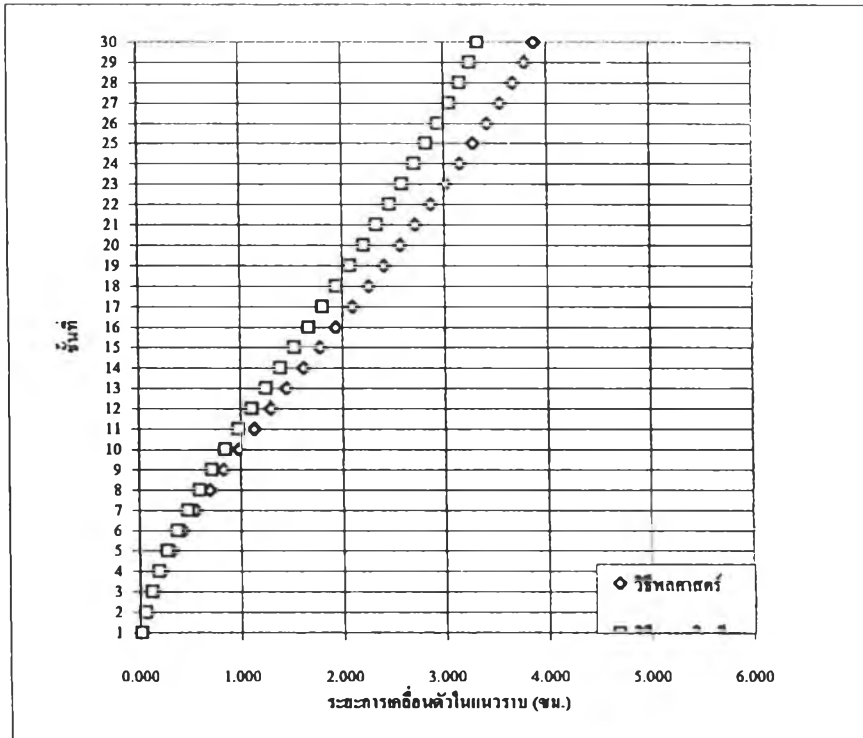




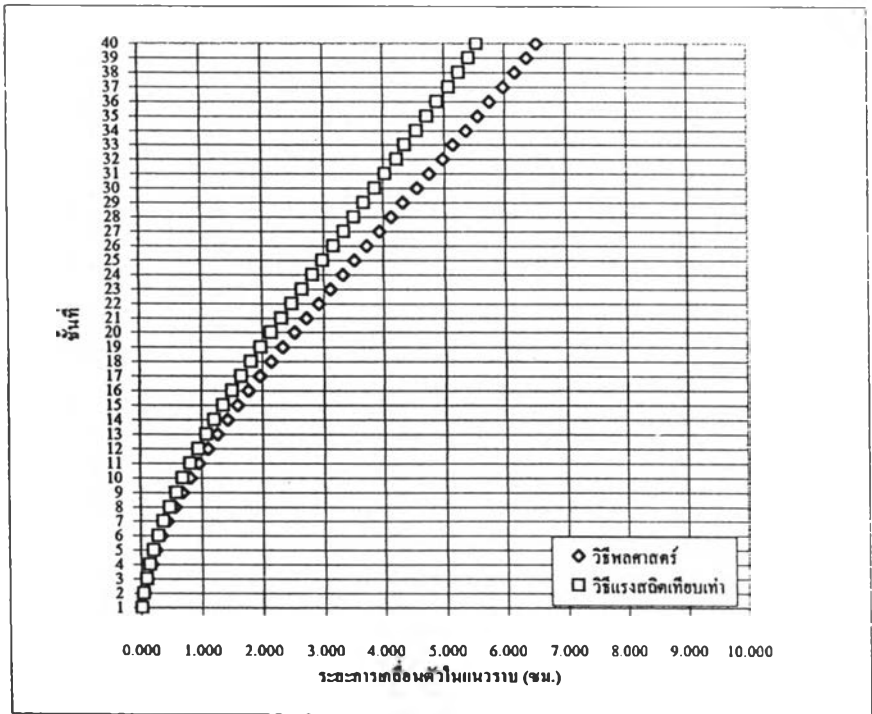
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์  
กับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับโครงสร้าง 10 ชั้น



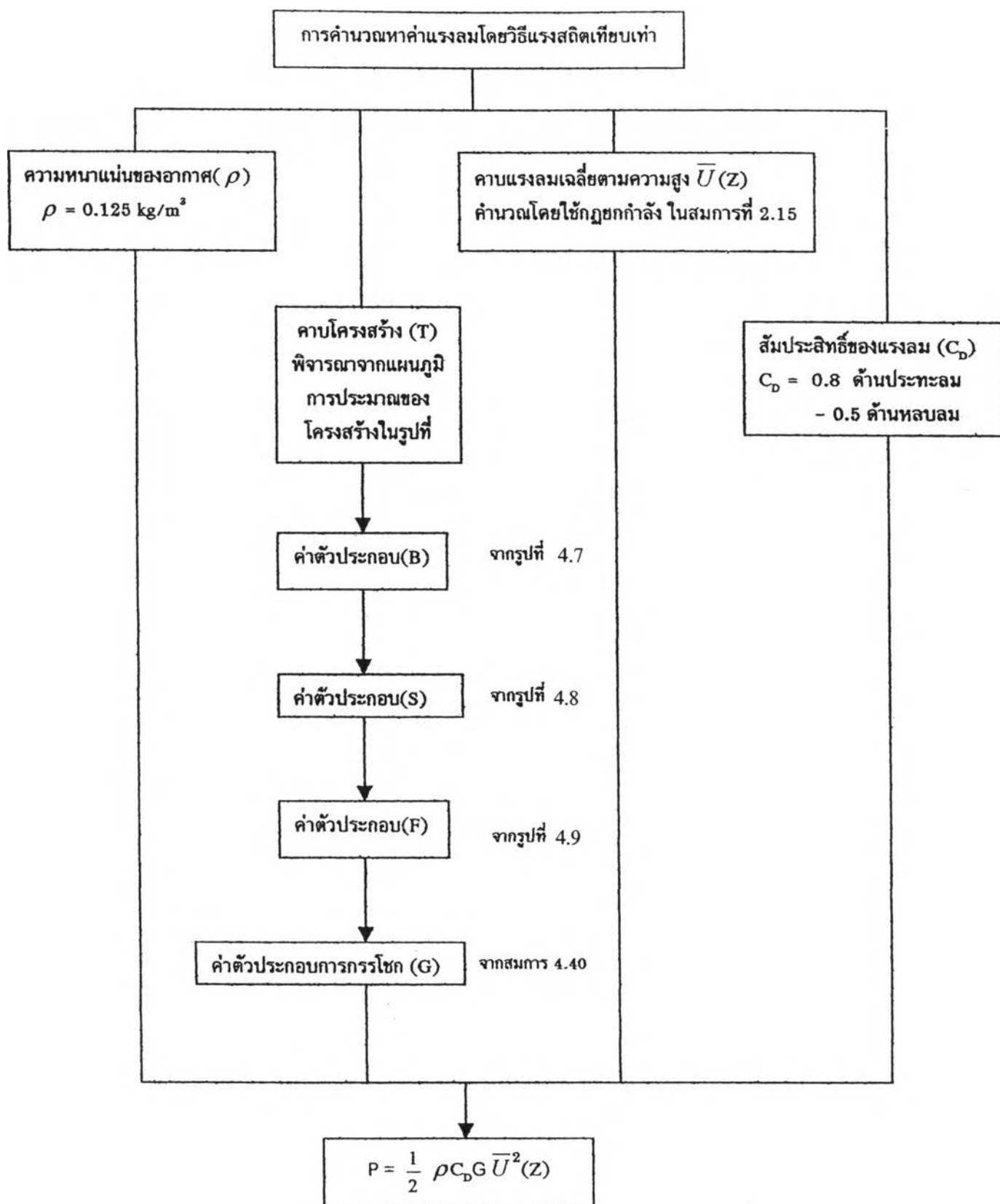
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์  
กับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับโครงสร้าง 20 ชั้น



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์  
กับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับโครงสร้าง 30 ชั้น



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของ โครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ กับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับ โครงสร้าง 40 ชั้น



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงการคำนวณหาค่าแรงลมโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า