

บทที่ 4

มาตรฐานการรวมผลของแรงลม

4.1 มาตรฐานการคำนวณหน่วยแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (มยผ.1311-50)

มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (มยผ.1311-50) ได้กำหนดวิธีการคำนวณหา แรงลมในทิศทางลม ไว้ 2 วิธีคือ สำหรับวิธีการอย่างละเอียด และวิธีการอย่างง่าย และกำหนดให้พิจารณาแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับแรงลมและโมเมนต์บิด สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักด้านทานแรงลม เมื่อโครงสร้างมีลักษณะเข้าข่ายดังต่อไปนี้ คือ

ก. อาคารที่มีอัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ ตั้งแต่ 3 ขึ้นไป

ข. อาคารมีรูปทรงสี่เหลี่ยมสม่ำเสมอ และมีอัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ ไม่เกิน 6 และ

อัตราส่วน $\frac{D}{W}$ มีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 5

ค. สำหรับการหาแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลมสถิตเทียบเท่า ใช้สำหรับอาคารมี

อัตราส่วน $\frac{V_H}{n_w \sqrt{WD}} \leq 10$

ง. สำหรับการโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่าใช้สำหรับ อาคารมีอัตราส่วน

$\frac{V_H}{n_T \sqrt{WD}} \leq 10$

โดยข้อกำหนดในข้อ ค. และ ง. เป็นข้อจำกัดในการใช้มาตรฐานเพื่อประมาณแรงลมสถิตเทียบเท่า ดังนั้นถ้าอาคารไม่เข้าข่ายในข้อ ค. และ ง. จะต้องใช้การทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อหาแรงสถิตเทียบเท่าเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

สำหรับการรวมผลของแรงที่กระทำต่ออาคาร มาตรฐานได้แยกวิธีการรวมผลของแรงลมสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักด้านทานแรงลม ไว้ต่างกันทั้ง 2 วิธีคือ

1. วิธีการอย่างง่าย ใช้สำหรับอาคารสูงปานกลางรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความสมมาตรทางโครงสร้าง มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร มีความสูงไม่เกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด และยกเว้นอาคารที่มีน้ำหนักเบา มีความถี่ธรรมชาติต่ำ และมีคุณสมบัติความหน่วงของอาคารต่ำ โดยใช้แรงในทิศทางลมกระทำเป็น 4 ลักษณะ ตามแบบของการรวมผลแรงลมสำหรับอาคารที่มีลักษณะแข็งแกร่ง (Rigid Building) ของมาตรฐาน ASCE 7-05

2. วิธีการอย่างละเอียด โดยคิดผลของแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม และโมเมนต์บิด เมื่ออาคารอยู่ในข้อกำหนด ก. ถึง ง. และมีความสูงเกิน 80 เมตร หรือ มีความสูงเกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด โดยพิจารณาแยกเป็น 2 กรณี คือ

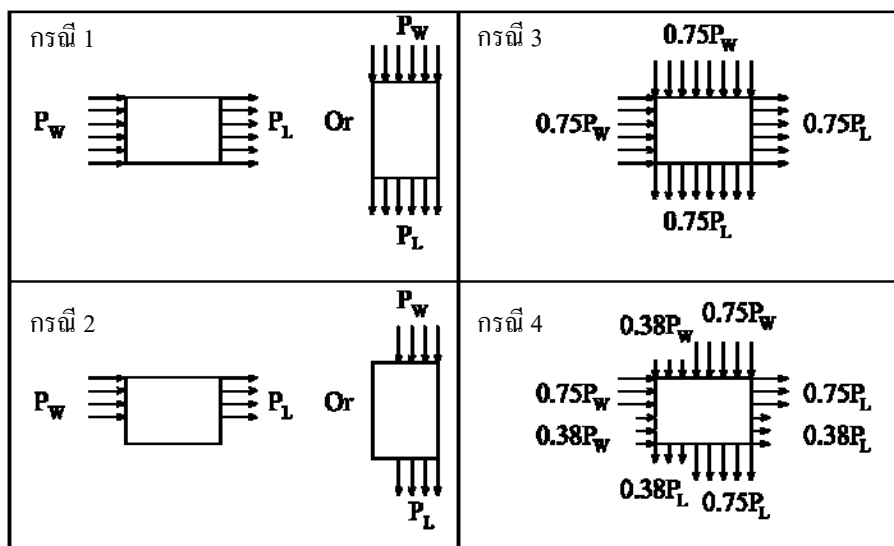
- $(1.00 \times \text{แรงลมในทิศทางลม}) + (0.4 \times \text{แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม}) + (0.40 \times \text{โมเมนต์บิด})$

- $\left(0.40 + \frac{0.60}{C_g}\right) \text{แรงลมในทิศทางลม}) + (1.00 \times \text{แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม}) + (1.00 \times \text{โมเมนต์บิด})$

4.2 National Building Code of Canada 2005 Volume 1 (NBC-2005)

มาตรฐาน NBC 2005 ได้กำหนดวิธีการหาแรงสถิตเทียบเท่าเพื่อออกแบบโครงสร้างหลักต้านทางแรงลม เพียงในส่วนของ แรงในทิศทางลมเท่านั้น แต่ได้กำหนดให้นำแรงลมในทิศทางลมกระทำกับโครงสร้าง เป็น 4 กรณี ตามภาพที่ 4.1 เพื่อคิดผลของแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม และโมเมนต์บิด ที่กระทำกับโครงสร้าง ดังนี้ คือ

1. แรงลมในทิศทางลมทั้งหมด กระทำในแต่ละด้านของแกนหลักของอาคาร
2. แรงลมกระทำในทิศทางลมแต่ละด้านของแกนหลักของอาคารแต่กระทำเพียงบางส่วนทางด้านที่พิจารณา เพื่อคิดผลของโมเมนต์บิดที่กระทำต่อโครงสร้าง
3. แรงกระทำด้วยร้อยละ 75 ของแรงในทิศทางลมในแต่ละด้าน กระทำพร้อมกันทั้ง 2 ด้านของอาคาร เพื่อพิจารณาแรงลมในส่วนของแรงลมในทิศตั้งฉากกับแรงลม
4. แรงกระทำตามลักษณะข้อ 3 แต่ให้ใช้ร้อยละ 50 ของแรงกระทำกับบางส่วน of โครงสร้าง เพื่อคิดผลของแรงในด้านตั้งฉากกับแรงลม และ โมเมนต์บิดที่เกิดกับอาคาร



ภาพที่ 4.1

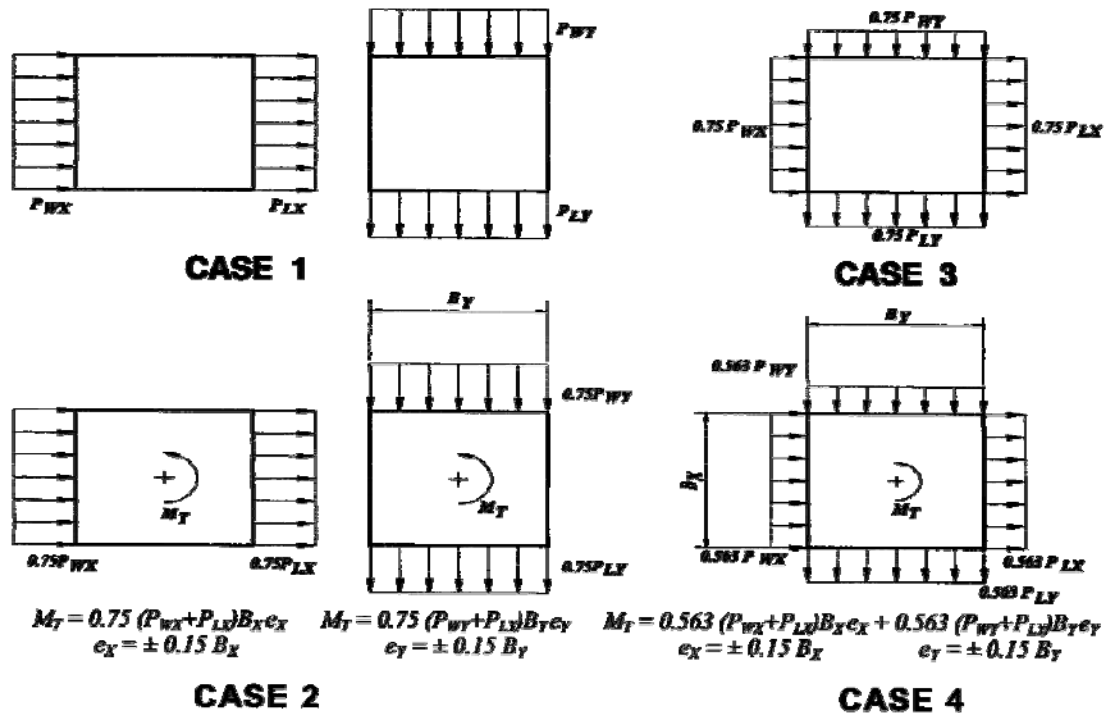
ลักษณะการรวมผลของแรงแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน NBC 2005

4.3 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-05)

มาตรฐาน ASCE 7-05 ได้กำหนดวิธีการคำนวณผลของแรงในทิศทางลมเท่านั้น และกำหนดให้พิจารณาถึงการรวมผลของแรงลม ในการออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม สำหรับอาคาร 2 ประเภทคือ

1. อาคารที่มีลักษณะแข็งเกร็ง (Rigid Building) ซึ่งหมายถึง อาคารที่มีค่าความถี่ธรรมชาติใน mode พื้นฐาน มากกว่าหรือ เท่ากับ 1 Hz
2. อาคารที่มีลักษณะอ่อนตัว (Flexible Building) ซึ่งหมายถึง อาคารที่มีค่าความถี่ธรรมชาติใน mode พื้นฐาน น้อยกว่า 1 Hz

และกำหนดให้ใช้ผลของแรงลมในนำแรงลมในทิศทางลมกระทำกับโครงสร้าง เป็น 4 กรณี ดังภาพที่ 4.2 เพื่อคิดผลของแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม และโมเมนต์บิด ที่กระทำกับโครงสร้าง



ภาพที่ 4.2

ลักษณะการรวมผลของแรงแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน ASCE7-05

โดยระยะเยื้องศูนย์กลาง e ของอาคารที่มีลักษณะแข็งเกร็ง จะหาได้จากภาพที่ 4.2 และระยะเยื้องศูนย์กลาง e ของอาคารที่มีลักษณะอ่อนตัว จะหาได้จากสมการที่ 4.1

$$e = \frac{e_Q + 1.7 I_{\bar{z}} \sqrt{(g_Q Q e_Q)^2 + (g_R R e_R)^2}}{1 + 1.7 I_{\bar{z}} \sqrt{(g_Q Q)^2 + (g_R R)^2}} \quad (4.1)$$

โดย $e_Q =$ ระยะเยื้องศูนย์กลางตามภาพที่ 4.2

$e_R =$ ระยะระหว่าง จุดศูนย์กลางแรงเฉือน และจุดศูนย์กลางถ่วง ของพื้นในแต่ละชั้น

$I_{\bar{z}} =$ the intensity of turbulence at height $\bar{z}$

$Q =$ Background response

g_R = Peak factor for resonant response

g_Q = Peak factor for background response = 3.4

R = Resonant response factor

สำหรับการหาค่าที่จำเป็นต้องใช้มีรายละเอียดดังนี้

$$\bar{I}_z = c \left(\frac{10}{z} \right)^{1/6}$$

$\bar{z}$ = ระดับความสูงเทียบเท่าของโครงสร้าง มีค่า เท่ากับ $0.6h$ แต่ต้องไม่น้อยกว่า z_{min}

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.63 \left(\frac{B+h}{\bar{L}_z} \right)^{0.63}}}$$

B และ h คือ ความกว้างในด้านหน้าลม และความสูงของโครงสร้างตามลำดับ

$$\bar{L}_z = l \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}}$$

z_{min} , c , l , $\bar{\epsilon}$ คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ ตามตารางที่ 4.1

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3,600n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3,600n_1)}}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47R_L)}$$

$$R_n = \frac{7.47N_1}{(1 + 10.3N_1)^{5/3}}$$

$$N_1 = \frac{n_1 \bar{L}_z}{\bar{V}_z}$$

$$R_L = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) \quad \text{สำหรับ } \eta > 0$$

$$R_L = 1 \quad \text{สำหรับ } \eta = 0$$

เมื่อ แทนสัญลักษณ์ l ใน R_L ด้วย h , B , L จะสามารถหาค่า R_h , R_B , R_L เพื่อใช้หาค่า

R ได้

โดย

n_l = ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง

R_L = R_h โดยแทน $\eta = 4.6n_l h / \bar{V}_z$

$$R_l = R_B \text{ โดยแทน } \eta = 4.6n_1B / \bar{V}_z$$

$$R_l = R_L \text{ โดยแทน } \eta = 15.4n_1L / \bar{V}_z$$

$$\beta = \text{อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง}$$

$$\bar{V}_z = \text{mean hourly wind speed ที่ความสูง } z$$

$$= \bar{b} \left(\frac{z}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V$$

$$V = \text{ความเร็วลมพื้นฐาน หน่วย เมตร ต่อ วินาที } (V_{3\text{sec}})$$

$$\bar{b}, \bar{\alpha} \text{ คือ ค่าคงที่จากตาราง ที่ 4.1}$$

ตารางที่ 4.1

ค่าคงที่ตามลักษณะภูมิประเทศตามมาตรฐาน ASCE 7-05

ลักษณะ ภูมิ ประเทศ	α	$z_g(m)$	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	c	$l(m)$	$\bar{\epsilon}$	$z_{min}(m)^*$
B	7.0	365.76	1/7	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.54	1/3.0	9.1
C	9.5	274.32	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.4	1/5.0	4.57
D	11.5	213.36	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.12	1/8.0	2.13

* z_{min} = ค่าความสูงต่ำสุดเพื่อให้แน่ใจว่า ระดับความสูงเทียบเท่า $\bar{z}$ มีค่ามากกว่า $0.6h$ หรือ z_{min} สำหรับอาคารที่ $h \leq z_{min}$ ให้ใช้เท่ากับ z_{min}

4.4 Structural design actions Part 2 : Wind actions (AS/NZS 1170.2-2002)

มาตรฐาน AS/NZS 1170.2-2002 ได้กำหนดวิธีการหาแรงสถิตเทียบเท่าเพื่อออกแบบโครงสร้างหลักด้านทางแรงลม โดยมีวิธีการหาแรงสถิตเทียบเท่าที่กระทำกับอาคาร ทั้งในส่วนของแรงในทิศทางลม และแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม แต่ไม่วิธีการหาโมเมนต์บิด โดยเนื้อหาในมาตรฐานครอบคลุมอาคารลักษณะดังนี้

- อาคารความสูงไม่เกิน 200 เมตร

- อาคารมีค่าความถี่ธรรมชาติ อยู่ระหว่าง 0.2-1.0 Hz

สำหรับการรวมผลของแรงในทิศทางลม และแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม มาตรฐานกำหนดให้ แยกแรงทั้ง 2 ออกเป็นแต่ละกรณีในการวิเคราะห์โครงสร้าง แล้วนำผลตอบสนอง ที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี มารวมกัน ตามสมการที่ 4.2

$$\epsilon_t = \epsilon_{a,m} + [\epsilon_{a,p}^2 + \epsilon_{c,p}^2]^{0.5} \quad (4.2)$$

เมื่อ

ϵ_t	=	ผลตอบสนองรวมเพื่อใช้ในการออกแบบ เช่น แรงในแนวแกนที่เกิดขึ้น
$\epsilon_{a,m}$	=	ผลตอบสนองในส่วนองแรงลมเฉลี่ย
	=	$\epsilon_{a,p}$ / Gust factor
$\epsilon_{a,p}$	=	ผลตอบสนองสูงสุด จากแรงในทิศทางลม
$\epsilon_{c,p}$	=	ผลตอบสนองสูงสุด จากแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม

แต่อย่างไรก็ตามในส่วนเพิ่มเติมของมาตรฐาน ได้กล่าวถึงวิธีประมาณ ในการรวมผลของแรงลมทั้ง 2 ทิศทาง ไว้เป็น 2 กรณี คือ

1. ร้อยละ 25 ของแรงลมเฉลี่ยในทิศทางลม รวมกับ ร้อยละ 75 ของแรงลมสูงสุดในทิศทางลม และ ร้อยละ 75 ของส่วนต่างของแรงลมสูงสุดกับแรงลมเฉลี่ย ในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม
2. แรงลมเฉลี่ยในทิศทางลม รวมกับผลต่างของแรงสูงสุดกับค่าเฉลี่ย ของแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม

4.5 Recommendations for loads on Buildings (AIJ-2004)

มาตรฐาน AIJ (2004) มีวิธีการคำนวณหาแรงที่กระทำกับโครงสร้างทั้ง แรงในทิศทางลม แรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม และโมเมนต์บิด โดยมาตรฐานกำหนดให้ พิจารณาแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม และโมเมนต์บิด เมื่ออาคารมีลักษณะดังข้อ ก. และกำหนดลักษณะอาคารซึ่งจะเกิดการขาดเสถียรภาพเนื่องแรงลมดังข้อ ข. ซึ่งต้องใช้การวิธีการทดสอบในอุโมงค์ลม เพื่อคำนวณหาผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงลม

ก. อาคารที่มีอัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ ตั้งแต่ 3 ขึ้นไป

ข. อาคารซึ่งจะเกิดการขาดเสถียรภาพเนื่องจากแรงลม แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1) อาคารที่มีรูปตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

ซึ่งมีอัตราส่วน

$$\frac{H}{\sqrt{WD}} \geq 4 \text{ และ } \left(\frac{U_H}{f_L \sqrt{BD}} \geq 0.83 U_{Lcr}^* \text{ Or } \frac{U_H}{f_T \sqrt{BD}} \geq 0.83 U_{Tcr}^* \right)$$

เมื่อ

$U_H (m/s)$ คือ ค่าความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบ

U_{Lcr}^* คือ ความเร็วไร้หน่วย ที่ทำให้เกิด aeroelastic instability

ในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม ดังแสดงในตารางที่ 6.2

U_{Tcr}^* คือ ความเร็วไร้หน่วย ที่ทำให้เกิด aeroelastic instability

ในแนวนอน ดังแสดงในตารางที่ 6.3

$f_L, f_T (Hz)$ คือ ความถี่ใน Mode แรก ในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม และ

ทิศทางในแนวนอน

2) อาคารที่มีรูปตัดเป็นรูปวงกลม

$$\text{ซึ่งมีอัตราส่วน } \frac{H}{\sqrt{D_m}} \geq 7 \text{ และ } \frac{U_H}{f_L \sqrt{D_m}} \geq 4.20$$

เมื่อ

D_m คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของโครงสร้างที่ระดับความสูง $2H/3$

การคำนวณแรงในทิศทางตั้งฉาก และโมเมนต์ ในมาตรฐาน AIJ (2004) ได้กำหนดวิธีการซึ่งใช้ได้เฉพาะ สำหรับอาคารที่มีลักษณะดังนี้

1.) อาคารมีรูปทรงสี่เหลี่ยมสม่ำเสมอ และมีอัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ ไม่เกิน 6 และ

อัตราส่วน $\frac{D}{W}$ มีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 5

2) สำหรับการหาแรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลมสถิตเทียบเท่า ใช้สำหรับ อาคารมี

อัตราส่วน $\frac{V_H}{n_w \sqrt{WD}}$ มีค่าไม่เกิน 10

3.) สำหรับการโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

ใช้สำหรับ อาคารมีอัตราส่วน $\frac{V_H}{n_T \sqrt{WD}}$ มีค่า ไม่เกิน 10

ตารางที่ 4.2

ความเร็ววิกฤตไร้หน่วย สำหรับการขาดเสถียรภาพในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม

Flat terrain categories	Side ratio D/B	Scruton number δ_L	Critical speed U_{Lcr}^*
I, II	$D/B \leq 0.80$	$\delta_L \leq 0.70$	$16 \delta_L$
		$\delta_L \geq 0.70$	11
	$0.8 < D/B \leq 1.5$	all	$1.2 \delta_L + 7.3$
	$1.5 < D/B \leq 2.5$	$\delta_L \leq 0.20$	2.3
		$0.20 \leq \delta_L \leq 0.80$	12
		$\delta_L > 0.80$	$15 \delta_L$
	$D/B > 2.5$	$\delta_L \leq 0.40$	3.7
		$\delta_L > 0.40$	Not necessary to evaluate
III, IV, V	$D/B \leq 0.80$	all	$4.5 \delta_L + 6.7$
	$0.8 < D/B \leq 1.2$	all	$0.7 \delta_L + 8.8$
	$D/B > 1.2$	all	11

 $\delta_L = \xi_L M / (3\rho BDH)$ และ ξ_L คือ อัตราส่วนความหน่วงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม ของอาคาร

ตารางที่ 4.3

ความเร็ววิกฤตไร้หน่วย สำหรับการขาดเสถียรภาพในแนวนอน

Side ratio D/B	Scruton number δ_T	Critical speed U_{Ter}^*
$D/B \leq 1.5$	$\delta_T \leq 0.05$	2
	$0.05 < \delta_T \leq 0.1$	11
	$\delta_T > 0.1$	Not necessary to evaluate
$1.5 < D/B \leq 2.5$	$\delta_T \leq 0.05$	2
	$0.05 < \delta_T \leq 0.15$	$4 + 8 \delta_T$
	$\delta_T > 0.15$	$8.6 + 7.4 \delta_T$
$2.5 < D/B \leq 5$	$\delta_T \leq 0.05$	2
	$\delta_T > 0.05$	$5 + 10.5 \delta_T$

 $\delta_T = \xi_T M (B^2 + D^2) / (36\rho B^2 D^2 H)$ และ ξ_T คือ อัตราส่วนความหน่วงในแนวนอนของอาคาร

การพิจารณาการรวมผลของแรง มาตรฐาน AIJ (2004) แยกอาคารเป็น 2 ประเภท

- อาคารที่มีค่าอัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ น้อยกว่า 3 ให้พิจารณาการรวมผลดังสมการที่

4.3

$$W_{LC} = \gamma W_D \quad (4.3)$$

เมื่อ $\gamma = 0.35 \frac{D}{B}$ และมากกว่า 0.20

โดย $W_{LC}(N)$ คือ แรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม

$W_D(N)$ คือ แรงในทิศทางลม

$B(m)$ คือ ความกว้างของอาคารในด้านต้นลม

$D(m)$ คือ ความลึกของอาคาร

- อาคารที่มีค่าอัตราส่วน $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ มากกว่า 3 ให้พิจารณาการรวมผลโดยคิดให้แรง

กระทำในรูปแบบต่างๆ 3 แบบ ตามตารางที่ 6.4 และใช้ค่า สัมประสิทธิ์ความสัมพันธิ์ร่วม ρ_{LT} ตามตารางที่ 6.5 โดย

$$\xi = \begin{cases} f_L / f_T : f_L \geq f_T \\ f_T / f_L : f_L < f_T \end{cases}$$

f_L, f_T = ความถี่ธรรมชาติใน Mode ที่ 1 สำหรับทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางบิดตามลำดับ

$$f_I = \text{ค่าน้อยระหว่าง } f_L \text{ และ } f_T$$

ตารางที่ 4.4

การรวมผลของแรงใน 3 ทิศทาง ตามมาตรฐาน AIJ (2004)

Combination	แรงในทิศทางลม	แรงในทิศทางตั้งฉากกับแรงลม	โมเมนต์บิด
1	W_D	$0.4 W_L$	$0.4 W_T$
2	$W_D \left(0.4 + \frac{0.6}{G_D} \right)$	W_L	$(\sqrt{2 + 2\rho_{LT}} - 1) W_T$
3	$W_D \left(0.4 + \frac{0.6}{G_D} \right)$	$(\sqrt{2 + 2\rho_{LT}} - 1) W_L$	W_T

* G_D = Gust effect factor สำหรับ แรงในทิศทางลม

ตารางที่ 4.5

ค่าสัมประสิทธิ์ความดัมพันร่วม ρ_{LT} ตามมาตรฐาน AIJ (2004)

D/B	$f_1 B / U_H$	ρ_{LT}		
		$\xi = 1.0$	$\xi = 1.1$	$\xi \geq 1.4$
≤ 0.5	≤ 0.1	0.9	0.3	0.2
	0.2	0.2	0.4	0.3
	0.3	0.2	0.5	0.4
	0.6	0.6	0.6	0.6
	≥ 1	0.4	0.7	0.7
1	≤ 0.1	0.7	0.2	0.2
	0.2	0.3	0.2	0.2
	0.3	0.2	0.2	0.2
	0.6	0.4	0.4	0.4
	≥ 1	0.5	0.5	0.5
≥ 2	≤ 0.05	0.6	0.2	0.2
	≥ 0.1	0.2	0.2	0.2

* สำหรับค่า ξ , $f_1 B / U_H$ และ D/B ที่อยู่ในช่วงของตาราง สามารถใช้ประมาณเชิงเส้นได้