

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบโครงสร้างเหล็ก

การออกแบบโครงสร้างเหล็ก เป็นการคำนวณเพื่อเลือกชนิดและขนาดของเหล็กรูปพรรณที่เหมาะสมหรือพิจารณารูปตัดต่างๆ ของเหล็กรูปพรรณและเหล็กแผ่นที่มีอยู่แล้วมาประกอบร่วมกัน (built-up section) เป็นองค์อาคารที่สามารถต้านทานแรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำได้โดยปลอดภัย ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน การออกแบบโครงสร้างเหล็กมีวิธีการเฉพาะสำหรับองค์อาคารแต่ละประเภท ขึ้นอยู่กับแรงซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีโครงสร้าง องค์อาคารที่ต้องพิจารณาการออกแบบ ได้แก่ องค์อาคารที่รับแรงตามแนวแกน ซึ่งอาจเป็นแรงดึงหรือแรงอัด องค์อาคารที่รับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน องค์อาคารที่รับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดร่วมกัน รวมถึงการพิจารณาออกแบบรอยต่อขององค์อาคาร เพื่อให้ทุกๆ ส่วนของโครงสร้างร่วมกันรับน้ำหนักได้ตามต้องการ [8]

2.2 ข้อกำหนด AISC

ก่อนปี ค.ศ. 2005 AISC กำหนดแนวทางการออกแบบโครงสร้างเหล็กไว้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD) ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมตั้งแต่ปี ค.ศ. 1989 และวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design, LRFD) ในปี 2005 AISC ได้รวมวิธีการออกแบบ วิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD) ซึ่งเปลี่ยนชื่อมาจากวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD) และวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design, LRFD) เข้าด้วยกัน การออกแบบต่างๆ จะใช้สูตรเดียวกัน แตกต่างเพียงตัวคูณปรับค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับการออกแบบ โดยวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD) จะใช้ตัวคูณความปลอดภัย (Ω) และวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design, LRFD) จะใช้ตัวคูณความต้านทาน (ϕ) ข้อกำหนด AISC ฉบับปรับปรุงล่าสุดคือฉบับปี ค.ศ. 2010 (ANSI/AISC 360-10) [5, 13, 14]

2.2.1 การออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD-1989)

หลักเกณฑ์การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้น (actual stress: f) ในองค์อาคารเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่าหน่วยแรงใช้งานที่ยอมให้ (allowable stress: F) น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (working load) คือน้ำหนักบรรทุกหรือแรงกระทำต่างๆ ที่คาดว่าจะ

อาคารนั้นจะต้องรับหรือต้านทาน ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load: D) น้ำหนักบรรทุกจร (live load: L) แรงแลม (wind load: W) หรือแรงจากแผ่นดินไหว (earthquake load: E) เป็นต้น ในการออกแบบต้องพิจารณาการรวมน้ำหนักหรือแรงกระทำต่าง ๆ เพื่อให้ได้น้ำหนักบรรทุกใช้งานสูงสุดที่กระทำต่อองค์อาคาร [8], [13]

แรงสูงสุดที่ได้จากการรวมน้ำหนักบรรทุก เป็นแรงที่จะนำไปออกแบบโครงสร้างต่อไป หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง (actual stress: f) เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยการรวมน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ หน่วยแรงที่ยอมให้ (allowable stress: F) ให้เป็นค่าที่ได้จากการหารค่ากำลังที่จุดครากหรือกำลังประลัยของวัสดุด้วยค่าตัวคูณความปลอดภัย (Factor of Safety: Ω) ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับประเภทขององค์อาคาร สำหรับหน่วยแรงที่เกิดจากลมหรือแผ่นดินไหวกระทำอย่างเดียวหรือกระทำร่วมกับน้ำหนักคงที่ และน้ำหนักจรที่ออกแบบ หน่วยแรงที่ยอมให้อาจเพิ่มได้อีกหนึ่งในสามจากค่าที่กำหนด [8]

2.2.1.1 การออกแบบขององค์อาคารรับแรงอัด

การออกแบบขององค์อาคารรับแรงอัด คือการเลือกหน้าตัดที่เหมาะสมเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกให้ได้ตามต้องการ สำหรับความยาวและสภาวะจุกรองรับที่กำหนดมา โดยพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.1 [8]

$$A = \frac{P}{f_a} \quad (2.1)$$

โดยที่ f_a = หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นจริง กก.ต่อซม.²
 A = พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น ซม.²
 P = น้ำหนักบรรทุกที่ต้องการ กก.

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ขององค์อาคารรับแรงอัด AISC [13] ได้จากการนำสูตรออยเลอร์ [9] มาหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยคงที่ในช่วงอีลาสติก และใช้สูตรพาราโบลิคหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยแปรผันในช่วงอินอีลาสติก ค่า C_c ที่ใช้แบ่งพฤติกรรมการโก่งเดาะแบบอีลาสติก ผลจากการโก่งเดาะแบบอินอีลาสติกเป็นค่าที่ได้จากการให้หน่วยแรงโก่งเดาะออยเลอร์เท่ากับ $F_y/2$ สามารถคำนวณได้จาก

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (2.2)$$

เมื่อ $KL/r \leq C_c$ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (F_a) คำนวณได้จาก

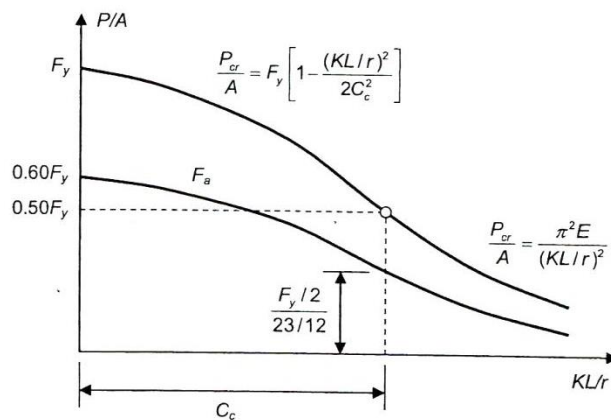
$$F_a = \frac{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right) + \frac{5}{8} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^3} \quad (2.3)$$

เมื่อ $KL/r \geq C_c$ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (F_a) คำนวณได้จาก

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad (2.4)$$

- โดยที่ L = ช่วงความยาวของเสาที่ไม่มีค้ำยันทางข้าง ซม.
 r = รัศมีจายเรชั่น (ที่น้อยที่สุด) ของพื้นที่รอบแกนที่เกิดการโก่งเดาะ ซม.
 E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก กก. ต่อ ซม.²
 F_y = กำลังครากของเหล็ก กก.ต่อ ซม.²
 K = ตัวคูณความยาวประสิทธิผล (ตารางที่ 2.1)
 F_a = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ กก. ต่อ ซม.²

สมการที่ 2.4 คือสูตรออยเลอร์หารด้วยส่วนปลอดภัยเท่ากับ 23/12 ส่วน สมการที่ 2.3 คือสมการพาราโบลาซึ่งมีความลาดเอียงเท่ากับสูตรออยเลอร์ที่ C_c และเท่ากับ F_y ที่ $KL/r = 0$ หารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยซึ่งจะมีค่าแปรเปลี่ยนจาก 1.67 ถึง 1.92 รูปที่ 2.1 แสดงเส้นโค้งของสมการทั้งสองที่ใช้ในการคำนวณแรงโก่งเดาะและหน่วยแรงที่ยอมให้ของเสา [9]



รูปที่ 2.1 หน่วยแรงโก่งเดาะและหน่วยแรงที่ยอมให้ของเสา [9]

(ที่มา: มงคล จิรวรรณเดช, 2553)

สำหรับหน้าตัดเสากลมกลวง รับน้ำหนักตามแนวแกน องค์อาคารที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา D/t มากกว่า $231,000/F_y$ แต่ไม่เกิน $903,000/F_y$ หน่วยแรงที่ยอมให้ต้องไม่มากกว่าค่าน้อยระหว่างค่าที่คำนวณได้ จากสมการที่ 2.3 สมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5 [11], [13]

$$F_a = \frac{46,500}{D/t} + 0.4F_y \quad (2.5)$$

โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ซม.
 t = ความหนา ซม.

ข้อกำหนด AISC แนะนำค่าตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล K ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 [13]

ตารางที่ 2.1 ตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผลของเสา [13]

(ที่มา: American Institute of Steel Construction, 2532)

Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
End condition code	   	Rotation fixed and translation fixed Rotation free and translation fixed Rotation fixed and translation free Rotation free and translation free				

2.2.1.2 การออกแบบของอาคารรับแรงดัด

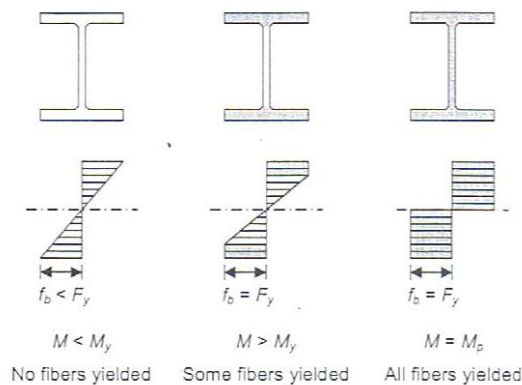
2.2.1.2.1 หน่วยแรงดัดในคาน

เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกทุก ฦ. ตำแหน่งใดๆ จะเกิดแรงภายในคือแรงเฉือน (V) และ โมเมนต์ดัด (M) หน่วยแรงดัด (f_b) [9] สามารถคำนวณได้จาก

$$f_b = \frac{MC}{I} = \frac{M}{S} \quad (2.6)$$

- โดยที่ C = ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวนอกสุดของหน้าตัด ซม.
 I = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดรอบแกนสะเทิน ซม.⁴
 S = I/C = โมดูลัสยืดหยุ่นของหน้าตัด ซม.³
 f_b = หน่วยแรงคดที่ยอมให้ กก.ต่อ ซม.²

หน่วยแรงคดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดแปรผันตามระยะจากแกนสะเทิน คานเหล็กส่วนใหญ่เป็นหน้าตัดปีกกว้างระยะ C จากแกนสะเทินถึงผิวบนและผิวล่างจะเท่ากัน เมื่อโมเมนต์คดเพิ่มขึ้นหน่วยแรงคดบนหน้าตัดก็จะเพิ่มขึ้นตาม จนกระทั่งหน่วยแรงที่ผิวนอกสุดถึงกำลังคราก (F_y) โมเมนต์นี้คือโมเมนต์คราก ($M_y = F_y S$) เมื่อเพิ่มโมเมนต์คดขึ้นอีก หน่วยแรงในบริเวณถัดเข้ามาจะค่อยๆ คราก จนกระทั่งการครากเกิดขึ้นทั้งหน้าตัด โมเมนต์คดที่สภาวะนี้เรียกว่า โมเมนต์พลาสติก (Plastic moment) (รูปที่ 2.2) [9]



รูปที่ 2.2 หน่วยแรงบนหน้าตัดที่ค่าโมเมนต์คดต่างๆ [9]
 (ที่มา: มงคล จิรวรรณเดช, 2553)

2.2.1.2.2 ลักษณะการวิบัติของคาน

ลักษณะการวิบัติของคานอันเนื่องมาจากโมเมนต์คดอาจเป็นผลจากแรงดึงและแรงอัดร่วมกัน กล่าวคือ ที่ด้านล่างของคานได้แนวแกนสะเทินจะถูกดึงจนครากและยืดตัวออก แต่ด้านบนของคานเหนือแนวแกนสะเทินจะถูกอัด เสมือนว่าทำหน้าที่เป็นเสา ดังนั้น การวิบัติของส่วนที่รับแรงอัดนี้อาจวิบัติในลักษณะของการ โกงเดาะเฉพาะแห่ง (local buckling) สาเหตุเพราะอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาของแต่ละชิ้นส่วนมีค่ามากเกินไป หรืออาจวิบัติในลักษณะที่เกิดการบิดและ โกงตัวทางข้าง (lateral torsional buckling) เพราะระยะค้ำยันทางข้างที่ด้านรับแรงอัดไม่พอเพียง [8]

1. การโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (local buckling) อาจเกิดที่ปีกคานด้านที่รับแรงอัด (Flange Local Buckling, FLB) หรือที่เหล็กแผ่นตั้งที่รับแรงอัด (Web Local Buckling, WLB) ก่อนที่คานจะสามารถ

รับโมเมนต์ดัดได้เท่ากับโมเมนต์พลาสติก ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาของแต่ละชิ้นส่วน (width-thickness ratio) สำหรับคานที่มีหน้าตัดแบบอัดแน่นจะไม่เกิดการวิบัติแบบนี้ [8]

2. การบิดและการโก่งตัวทางข้าง (Lateral Torsional Buckling, LTB) จะเกิดขึ้นเมื่อคานปราศจากค้ำยันทางข้างที่ปีกคานด้านรับแรงอัดหรือเมื่อระยะค้ำยันทางข้างไม่พอเพียง เป็นเหตุให้ปีกคานด้านที่รับแรงอัด เกิดการโก่งตัวออกทางข้างในขณะที่ปีกคานด้านที่รับแรงดึงถูกดึงเหยียดตรง ดังนั้นตัวคานจึงถูกบิดเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำที่ปีกคานด้านบน ทำให้ความสามารถต้านโมเมนต์ดัดของคานลดลง

2.2.1.2.3 การจำแนกประเภทหน้าตัดคาน

ข้อกำหนด AISC/ASD [13] จำแนกประเภทหน้าตัดคานเป็นแบบอัดแน่น (compact) แบบไม่อัดแน่น (noncompact) และแบบชะลูด (slender) โดยพิจารณาจากอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (width-thickness ratio) ของแต่ละชิ้นส่วนที่รับแรงอัดเนื่องจากโมเมนต์ดัด ได้แก่ แผ่นเหล็กปีกคาน (flange) และแผ่นดั่ง (web) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [8]

ตารางที่ 2.2 พิกัดอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วนรับแรงอัดสำหรับหน้าตัดต่างๆ [8]
(ที่มา: วินิต ช่อวิเชียร, 2553)

Description of element	ASD and LRFD	ASD	LRFD
	Compact, λ_p	Noncompact	Noncompact, λ_r
Flanges of I-shaped rolled beams and channels in flexural	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$0.56\sqrt{E/F_y}$	$0.83\sqrt{\frac{E}{F_y - 700}}$
Flanges of I-shaped welded beams in flexural	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$0.56\sqrt{E/F_y/k_c}$	$0.62\sqrt{\frac{E}{F_y - 1150}}$
Outstanding legs of pairs of angles in continuous contact; angles or plates projecting from rolled beams or columns; stiffeners on plate girders	Not specified	$0.56\sqrt{E/F_y}$	$0.56\sqrt{E/F_y}$
Flange of square and rectangular box sections; flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	$1.12\sqrt{E/F_y}$	$1.40\sqrt{E/F_y}$	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y - F_r}}^*$
Unsupported width of cover plates perforated with a succession of access holes	Not specified	$1.86\sqrt{E/F_y}$	$1.86\sqrt{\frac{E}{F_y - F_r}}^*$
Legs of single angle struts and double angle struts with separators; unstiffened elements	Not specified	$0.45\sqrt{E/F_y}$	$0.45\sqrt{E/F_y}$
Stems of tees	Not specified	$0.75\sqrt{E/F_y}$	$0.75\sqrt{E/F_y}$
All other uniformly compressed stiffened elements	Not specified	$1.49\sqrt{E/F_y}$	$1.49\sqrt{E/F_y}$
Webs in flexural compression	$3.76\sqrt{E/F_y}$	$4.46\sqrt{E/F_b}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$
Circular hollow sections			
in axial compression for ASD	$0.11E/F_y$	Not Specified	
in flexure for ASD	$0.11E/F_y$		
in axial compression for LRFD	Not specified		$0.11E/F_y$
in flexure for LRFD	$0.07E/F_y$		$0.31E/F_y$

* F_r = compressive residual stress in flange; 700 ksc for rolled shapes, 1150 ksc for welded sections.

$k_c = 4.05/(h/t)^{0.46}$ for $h/t > 70$; otherwise, $k_c = 1$

2.2.1.2.4 ระยะค้ำยันด้านข้าง

ข้อกำหนด AISC/ASD [13] ให้พิจารณาระยะค้ำยันทางข้าง L_b ที่ด้านรับแรงอัดว่าเพียงพอหรือไม่ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับระยะ L_c ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าระหว่างสมการที่ 2.7-2.8 [8]

$$L_c = 0.44b_f\sqrt{E/F_y} \quad (2.7)$$

$$L_c = 0.69E/(dF_y/A_f) \quad (2.8)$$

โดยที่ $L_b \leq L_c$ = ระยะค้ำยันด้านข้างพอเพียง
 $L_b > L_c$ = ระยะค้ำยันด้านข้างไม่พอเพียง
 E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก กก. ต่อ ซม.²
 F_y = กำลังจุดครากของเหล็ก กก.ต่อ ซม.²
 b_f, t_f = ความกว้างและความหนาของเหล็กปีกคานตามลำดับ ซม.
 d, t_w = ความลึกและความหนาของแผ่นคานตามลำดับ ซม.
 A_f = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเหล็กปีกคาน ซม.²
 L_b = ช่วงความยาวระหว่างค้ำยัน ซม.

2.2.1.2.5 หน่วยแรงดัดที่ยอมให้

ข้อกำหนด AISC/ASD [13] ให้พิจารณาหาหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคานเหล็กรูปดัดแบบตัว I , W (Wide Flange) หรือตัว C เมื่อระยะค้ำยันด้านข้างพอเพียง ($L_b \leq L_c$) [8]

องค์อาคารที่มีหน้าตัดอัดแน่น สมมาตรแกนรองและรับน้ำหนักในระนาบของแกนรอง หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลัก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9 และหน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนรอง [8] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 [8]

$$F_{bx} = 0.66F_y \quad (2.9)$$

$$F_{by} = 0.75F_y \quad (2.10)$$

องค์อาคารหน้าตัดแบบไม่อัดแน่น หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลักและแกนรอง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 [8]

$$F_{bx} = F_{by} = 0.60F_y \quad (2.11)$$

2.2.1.3 การออกแบบของค้ำอาคารรับแรงอัดและแรงดัด

การวิเคราะห์และออกแบบของค้ำอาคารรับหน่วยแรงร่วมกระทำ ทำโดยคำนวณอัตราส่วนของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยแรงที่ยอมให้แต่ละรูปแบบมารวมกัน โดยกำหนดให้ผลรวมมีค่าไม่เกิน 1.0 [9], [13] ดังนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{fa}{Fa} > 0.15$$

$$\frac{fa}{Fa} + \frac{C_{mx}f_{bx}}{\left[1 - \frac{fa}{F'_{ex}}\right]F_{bx}} + \frac{C_{my}f_{by}}{\left[1 - \frac{fa}{F'_{ey}}\right]F_{by}} \leq 1.0 \quad (2.12)$$

$$\frac{fa}{0.6F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (2.13)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{fa}{Fa} \leq 0.15$$

$$\frac{fa}{Fa} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (2.14)$$

โดยที่ fa = หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นจริง กก. ต่อ ซม.²
 f_{bx} = หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจริงรอบแกน x กก. ต่อ ซม.²
 f_{by} = หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจริงรอบแกน y กก. ต่อ ซม.²
 F_a = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ กก. ต่อ ซม.²
 F_{bx} = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้รอบแกน x กก. ต่อ ซม.²
 F_{by} = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้รอบแกน y กก. ต่อ ซม.²
 $F'_e = \frac{12\pi^2 E}{23(KL_b/r_b)^2}$ เป็นค่าของหน่วยแรงออยเลอร์เมื่อหารด้วยอัตราส่วนปลอดภัย
 F_y = กำลังครากของเหล็ก กก.ต่อซม.²
 E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก กก. ต่อ ซม.²
 K = ตัวคูณความยาวประสิทธิผล
 L_b = ช่วงความยาวระหว่างค้ำยันในระนาบที่รับโมเมนต์ดัด ซม.
 r_b = รัศมีไจเรชันรอบแกนที่รับโมเมนต์ดัด ซม.
 C_m = ค่าสัมประสิทธิ์ (modification factor) ขึ้นอยู่กับลักษณะการกระทำของโมเมนต์ดัด
 น้ำหนักบรรทุก และการเซขององค์อาคารที่พิจารณา

2.2.2 การออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD-2010)

วิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design) เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สภาวะการใช้งาน (service state) เป็นเกณฑ์ กล่าวคือ แรงต่างๆ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีอิลาสติกจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานขององค์อาคาร ซึ่งคำนวณโดยใช้ความต้านทานระบุ (nominal resistance) ลดค่าด้วยตัวคูณความปลอดภัย (factor of safety, Ω) เป็นดังสมการที่ 2.15 [5]

$$Q_a = R_n / \Omega \quad (2.15)$$

โดยที่ Q_a = แรงต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานวิเคราะห์จากทฤษฎีอิลาสติก
 R_n = ความต้านทานระบุ (nominal resistance)
 Ω = ตัวคูณความปลอดภัย

2.2.2.1 การออกแบบของค้ำอาคารรับแรงอัด

2.2.2.1.1 การออกแบบของค้ำอาคารรับแรงอัด ประเภทหน้าตัดชิ้นส่วนไม่ชะลูด

เกณฑ์ออกแบบด้านกำลัง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 [5]

$$P_a = P_n / \Omega_c \quad (2.16)$$

โดยที่ P_a = กำลังอัดตามแนวแกนที่ใช้งานและต้องการ กก.
 P_n = กำลังอัดตามแนวแกนระบุ $= F_{cr} A_g$ กก.
 F_{cr} = หน่วยแรงอัดวิกฤต กก. ต่อ ซม.²
 A_g = พื้นที่หน้าตัดรวม ซม.²
 Ω_c = ตัวคูณความปลอดภัย = 1.67

หน่วยแรงอัดวิกฤต (F_{cr}) คำนวณได้จากการพิจารณาสภาวะการวิบัติ ได้แก่ การโก่งเคาะในช่วงอิลาสติก และการโก่งเคาะในช่วงอินอิลาสติก (รูปที่ 2.3)

การโก่งเคาะในช่วงอิลาสติก (ไม่รวมกรณีที่มีหน้าตัดมีชิ้นส่วนชะลูด)

เมื่อ $KL/r > 4.71\sqrt{E/F_y}$ หรือ $F_y/F_e \leq 2.5$ หน่วยแรงอัดวิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad (2.17)$$

การโก่งเดาะในช่วงอินอีลาสติก (ไม่รวมกรณีที่หน้าตัดมีชิ้นส่วนชะลูด)

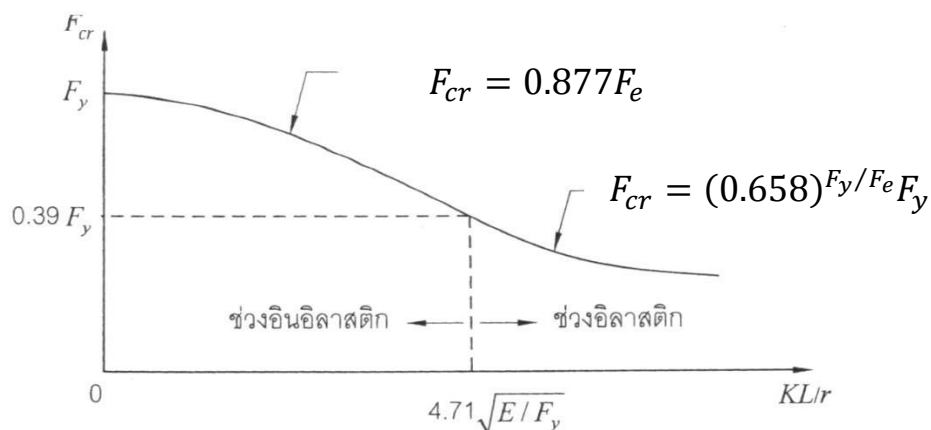
เมื่อ $KL/r \leq 4.71\sqrt{E/F_y}$ หรือ $F_y/F_e > 2.5$ หน่วยแรงอัดวิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18

$$F_{cr} = (0.658)^{F_y/F_e} F_y \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$F_e = \pi^2 E / (KL/r)^2 \quad (2.19)$$

- โดยที่ F_y = กำลังคราก กก. ต่อ ซม.²
 F_e = หน่วยแรงอัดอีลาสติก กก. ต่อ ซม.²
 E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก กก. ต่อ ซม.²
 K = ตัวคูณความยาวประสิทธิผล
 r = รัศมีจายเรชัน ซม.



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงหน่วยแรงอัดวิกฤตขององค์อาคารรับแรงอัด หน้าตัดชิ้นส่วนไม่ชะลูด [5]

(ที่มา: ทักษิณ เทพชาตรีและอัครวัชร เล่นาวารี, 2555)

2.2.2.1.2 การออกแบบด้านความชะลูด

ในการออกแบบของค้ำอาคารรับแรงอัด ไม่ควรใช้ค่าอัตราส่วนชะลูด $KL/r \geq 200$

2.2.2.1.3 องค์อาคารเหล็กฉากเดี่ยวรับแรงอัด

กรณีเหล็กฉากเดี่ยวที่มีการยึดที่ปลายเพียงหนึ่งขา ไม่มีแรงทางขวางกระทำภายในองค์อาคารและ ปลายยึดต่อด้วยการเชื่อมหรือสลักเกลียวอย่างน้อย 2 ตัว AISC [14] การคำนวณหน่วยแรงอัดวิกฤต ต้องใช้ค่าอัตราส่วนชะลูดประสิทธิผลดังนี้

ในโครงถักระนาบ (Planar Truss) สำหรับเหล็กฉากเดี่ยวขาเท่ากันและขาไม่เท่ากันที่ยึดต่อแผ่นขาที่ ยาวกว่า

เมื่อ $0 < L/r_x \leq 80$ อัตราส่วนชะลูดประสิทธิผลคำนวณโดย

$$KL/r = 72 + 0.75(L/r_x) \quad (2.20)$$

เมื่อ $0 < L/r_x > 80$ อัตราส่วนชะลูดประสิทธิผลคำนวณโดย

$$KL/r = 32 + 1.25(L/r_x) \leq 200 \quad (2.21)$$

ในโครงถักกล่องและสามมิติ (Space Truss) สำหรับเหล็กฉากเดี่ยวขาเท่ากันและขาไม่เท่ากันที่ยึดผ่าน ขาที่ยาวกว่า

เมื่อ $0 < L/r_x \leq 75$ อัตราส่วนชะลูดประสิทธิผลคำนวณโดย

$$KL/r = 60 + 0.80(L/r_x) \quad (2.22)$$

เมื่อ $L/r_x > 75$ อัตราส่วนชะลูดประสิทธิผลคำนวณโดย

$$KL/r = 45 + (L/r_x) \leq 200 \quad (2.23)$$

โดยที่ KL/r = อัตราส่วนชะลูดประสิทธิผล

L = ความยาวขององค์อาคารเหล็กฉากเดี่ยว ซม.

r_x = รัศมีไจเรชั่นรอบแกนที่เหล็กลากเกิดการโก่งเดาะ (Buckling) ชม.

2.2.2.1.4 การโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling)

การโก่งเดาะที่เกิดขึ้นที่ปีก เอว หรือส่วนใดส่วนหนึ่งขององค์อาคารรับแรงอัด เรียกว่าการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนของเหล็กแผ่นบาง ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (b/t) ของแผ่นเหล็ก และสภาพจุดรองรับที่ปลายในทิศทางขนานกับทิศทางที่แรงภายนอกกระทำ ข้อกำหนด AISC [14] กำหนดนิยามดังนี้

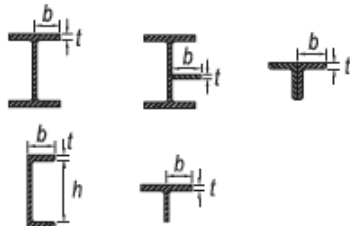
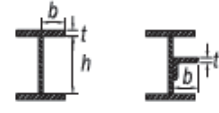
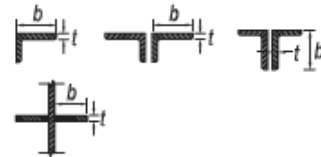
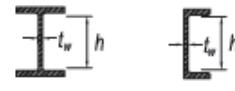
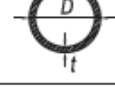
1. ชิ้นส่วนปลายยื่น (Unstiffened Element) ได้แก่แผ่นบางที่ปลายข้างหนึ่งในทิศทางขนานกับหน่วยแรงอัดเป็นอิสระ และอีกข้างหนึ่งมีการยึด ตามตารางที่ 2.3
2. ชิ้นส่วนปลายยึด (Stiffened Element) ได้แก่แผ่นบางที่ปลายทั้งสองข้างในทิศทางขนานกับหน่วยแรงอัดมีการยึด ตามตารางที่ 2.3

2.2.2.1.5 ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของแผ่นบางเพื่อป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะที่

ข้อกำหนด AISC [14] ได้จำแนกชนิดของหน้าตัดเหล็กไว้ 3 ประเภท ดังนี้

1. หน้าตัดอัดแน่น (compact section) ได้แก่ หน้าตัดเหล็กซึ่งมีค่า b/t ของทุกชิ้นส่วนขององค์อาคารน้อยกว่า λ_p ($b/t < \lambda_p$) ซึ่งคานในประเภทหน้าตัดอัดแน่นนี้ คานมีกำลังรับโมเมนต์ได้ถึงโมเมนต์พลาสติก (plastic moment, M_p) โดยที่จะต้องมีการยึดด้านข้างที่เพียงพอ เพื่อไม่ให้เกิดการโก่งเดาะเนื่องจากการบิดด้านข้าง (lateral-torsional buckling) [5]
2. หน้าตัดไม่อัดแน่น (non-compact section) ได้แก่หน้าตัดเหล็กซึ่งมีค่า b/t ของชิ้นส่วนขององค์อาคารอยู่ระหว่าง λ_p และ λ_r ($\lambda_p < b/t \leq \lambda_r$) [5] ตามตารางที่ 2.3
3. หน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด (slender element section) ได้แก่หน้าตัดเหล็กซึ่งมีค่า b/t ของชิ้นส่วนขององค์อาคารมากกว่าค่า λ_r ($b/t > \lambda_r$) ในกรณีนี้เหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ ก่อนที่องค์อาคารจะรับแรงได้ถึงหน่วยแรงอัดวิกฤต (F_{cr}) [5]

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาสูงสุด b/t สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัด [14]
(ที่มา: American Institute of Steel Construction, 2553)

	Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio λ_r (nonslender/slender)	Examples
Unstiffened Elements	1	Flanges of rolled I-shaped sections, plates projecting from rolled I-shaped sections; outstanding legs of pairs of angles connected with continuous contact, flanges of channels, and flanges of tees	b/t	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2	Flanges of built-up I-shaped sections and plates or angle legs projecting from built-up I-shaped sections	b/t	^[a] $0.64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$	
	3	Legs of single angles, legs of double angles with separators, and all other unstiffened elements	b/t	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4	Stems of tees	d/t	$0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	5	Webs of doubly-symmetric I-shaped sections and channels	h/t_w	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6	Walls of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7	Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8	All other stiffened elements	b/t	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9	Round HSS	D/t	$0.11 \frac{E}{F_y}$	

2.2.2.1.6 การออกแบบของค้ำอาคารรับแรงอัด ประเภทหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด

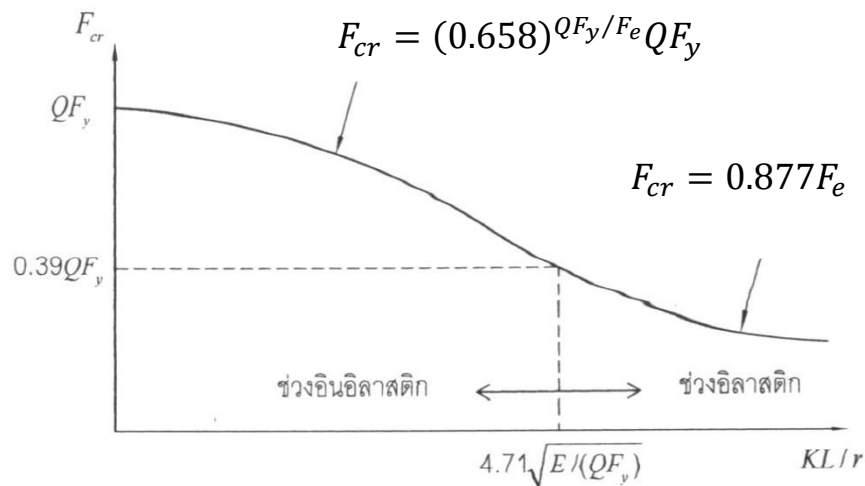
หน่วยแรงอัดวิกฤต (F_{cr}) ในองค์อาคารรับแรงอัดที่มีชิ้นส่วนชะลูด สามารถคำนวณได้โดยการแทนค่า F_y ด้วย QF_y ในสมการที่ 2.18 และ 2.19 โดยพิจารณาสถานะการวิบัติ ได้แก่ การโก่งเดาะในช่วงอีลาสติกและการโก่งเดาะในช่วงอินอีลาสติก (รูปที่ 2.4) [5]

เมื่อ $KL/r > 4.71\sqrt{E/QF_y}$ หรือ $QF_y/F_e > 2.5$ หน่วยแรงอัดวิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.24

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad (2.24)$$

เมื่อ $KL/r \leq 4.71\sqrt{E/QF_y}$ หรือ $QF_y/F_e \leq 2.5$ หน่วยแรงอัดวิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.25

$$F_{cr} = (0.658)^{QF_y/F_e} QF_y \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงหน่วยแรงอัดวิกฤตขององค์อาคารรับแรงอัด หน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด [5]

(ที่มา: ทักษิณ เทพชาตรีและอัครวัชร เล่นวารี, 2555)

สำหรับหน้าตัดกลมกลวง เมื่อ $0.11E/F_y < D/t \leq 0.45E/F_y$ ค่า Q สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.26 [5]

$$Q = Q_a = \frac{0.038E}{F_y(D/t)} + \frac{2}{3} \quad (2.26)$$

โดยที่ F_y = กำลังคราก กก. ต่อ ซม.²

F_e = หน่วยแรงอัดอีลาสติก กก. ต่อ ซม.²

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก กก. ต่อ ซม.²

K = ตัวคูณความยาวประสิทธิผล

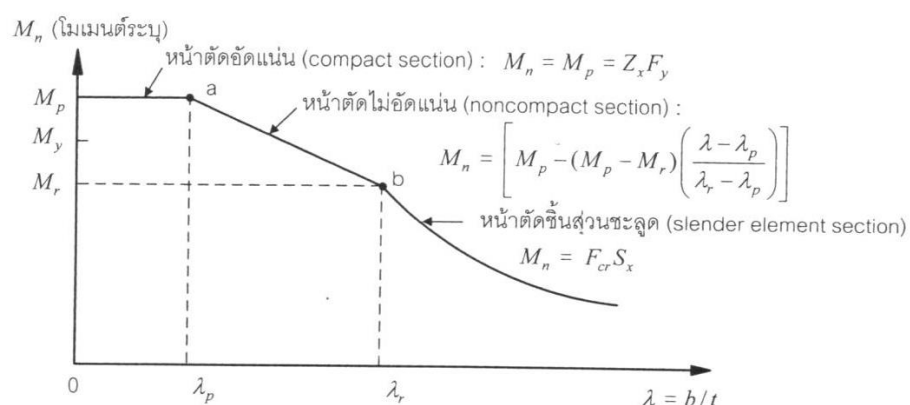
- r = รัศมีไจเรชั่น ซม.
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก ซม.
 t = ความหนา ซม.

2.2.2.2 องค์การรับแรงดัด

2.2.2.2.1 การจำแนกประเภทหน้าตัดคาน

คานสามารถแยกประเภทตามคุณสมบัติหน้าตัดคานได้ 3 ประเภทได้แก่

1. คานหน้าตัดอัดแน่น (compact section) คือคานที่ชิ้นส่วนในหน้าตัดมีค่าอัตราส่วนความละเอียด $\lambda = b/t$ ไม่เกินพิกัด λ_p องค์การจะรับแรงได้ถึงโมเมนต์พลาสติก (M_p) ข้อกำหนด AISC [14] ให้ค่า λ_p ของคานหน้าตัดต่างๆ ตามตารางที่ 2.4
2. คานหน้าตัดไม่อัดแน่น (noncompact section) คือคานที่ชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งในหน้าตัดมีค่า $\lambda = b/t$ เกินกว่าพิกัด λ_p แต่ไม่เกินพิกัด λ_r ชิ้นส่วนนั้นมีแนวโน้มจะเกิดการโก่งเดาะแบบอินอีลาสติก ก่อนที่องค์การจะรับแรงได้ถึงโมเมนต์พลาสติก (M_p) ข้อกำหนด AISC [14] ให้ค่า λ_p ของคานหน้าตัดต่างๆ ตามตารางที่ 2.4
3. คานหน้าตัดชิ้นส่วนละเอียด (slender element section) คือคานที่ชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งในหน้าตัดมีค่า $\lambda = b/t$ เกินกว่าพิกัด λ_r ชิ้นส่วนนั้นมีแนวโน้มจะเกิดการโก่งเดาะแบบอีลาสติก ก่อนที่องค์การจะรับแรงได้ถึงโมเมนต์พลาสติก (M_p) ข้อกำหนด AISC [14] ให้ค่า λ_p ของคานหน้าตัดต่างๆ ตามตารางที่ 2.4

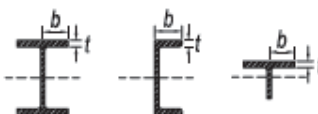
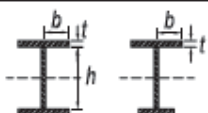
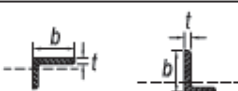
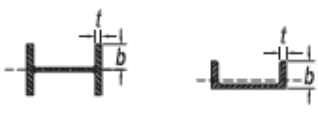
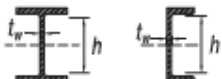
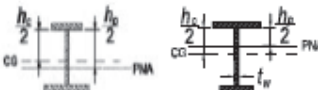
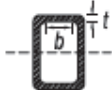
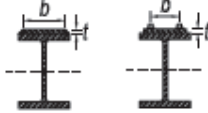


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงดัดระดับ (M_n) เนื่องจากการดัดในระนาบกับอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วน (λ) การดัดรอบแกน x [5]
 (ที่มา: ทักยิณ เทพชาตรีและอัครวัชร เล่นาวรี, 2555)

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงดัดกระทำ (M_n) กับอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วน $\lambda = b/t$ เมื่อค่ากำลังแรงดัดกระทำ (M_n) มีค่าลดลง ค่า λ จะมีค่ามากขึ้น [5]

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วน $\lambda = b/t$ สำหรับชิ้นส่วนในคาน [14]

(ที่มา: American Institute of Steel Construction, 2553)

	Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Examples
				λ_p (compact/ noncompact)	λ_r (noncompact/ slender)	
Unstiffened Elements	10	Flanges of rolled I-shaped sections, channels, and tees	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$ [a] [b]	
	12	Legs of single angles	b/t	$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Flanges of all I-shaped sections and channels in flexure about the weak axis	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	Stems of tees	d/t	$0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	15	Webs of doubly-symmetric I-shaped sections and channels	h/t_w	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	16	Webs of singly-symmetric I-shaped sections	h_c/t_w	$\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ [c] $\left(\frac{0.54 M_p}{M_y} - 0.09 \right) \leq \lambda_r$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	17	Flanges of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	18	Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	19	Webs of rectangular HSS and boxes	h/t	$2.42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	20	Round HSS	D/t	$0.07 \frac{E}{F_y}$	$0.31 \frac{E}{F_y}$	

[a] $k_c = 4/\sqrt{h/t_w}$ but shall not be taken less than 0.35 nor greater than 0.76 for calculation purposes.
[b] $F_L = 0.7 F_y$ for major axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with $S_{xt}/S_{xc} \geq 0.7$;
 $F_L = F_y S_{xt}/S_{xc} \geq 0.5 F_y$ for major axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with $S_{xt}/S_{xc} < 0.7$.
[c] M_y is the moment at yielding of the extreme fiber. M_p = plastic bending moment, kip-in. (N-mm)
 E = modulus of elasticity of steel = 29,000 ksi (200 000 MPa)
 F_y = specified minimum yield stress, ksi (MPa)

2.2.2.2.2 เกณฑ์การออกแบบภายใต้การดัด

เกณฑ์การออกแบบภายใต้การดัดสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.27 [14]

$$M_r \leq M_c \quad (2.27)$$

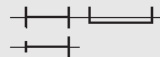
โดยที่ M_r = กำลังแรงดัดที่ต้องการ กก.-ชม.

M_c = กำลังแรงดัดที่สามารถรับได้ กก.-ชม.

ตารางที่ 2.5 แสดงลักษณะการวิบัติของคานหน้าตัดทุกประเภทโดยค่ากำลังแรงดัดระบุ (M_n) ที่จะนำไปใช้ในการออกแบบจะเป็นค่าที่น้อยกว่าจากลักษณะการวิบัติที่อาจเกิดขึ้นกับคานนั้น สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้หน้าตัดกลมกลวง (HSS) ในการออกแบบจะพิจารณาลักษณะการวิบัติจากการคราก (yielding) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะการวิบัติของคานหน้าตัดต่างๆ ภายใต้การดัด [14]

(ที่มา: American Institute of Steel Construction, 2553)

Section in Chapter F	Cross Section	Flange Slenderness	Web Slenderness	Limit States
F2		C	C	Y, LTB
F3		NC, S	C	LTB, FLB
F4		C, NC, S	C, NC	Y, LTB, FLB, TFY
F5		C, NC, S	S	Y, LTB, FLB, TFY
F6		C, NC, S	N/A	Y, FLB
F7		C, NC, S	C, NC	Y, FLB, WLB
F8		N/A	N/A	Y, LB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, FLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Unsymmetrical shapes, other than single angles	N/A	N/A	All limit states

Y = yielding, LTB = lateral-torsional buckling, FLB = flange local buckling, WLB = web local buckling, TFY = tension flange yielding, LLB = leg local buckling, LB = local buckling, C = compact, NC = noncompact, S = slender

สำหรับหน้าตัดกลมกลวง (HSS) โดยที่ $\lambda = \frac{D}{t} \leq 0.45E/F_y$

จากตารางที่ 2.5 ให้พิจารณาลักษณะการวิบัติจากการคราก (yielding) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ให้ใช้ค่ากำลังแรงดัดกระทำ (M_n) ที่น้อยกว่าจากสมการที่ 2.28 สมการที่ 2.29 และสมการที่ 2.30 [5]

1. ลักษณะการวิบัติจากการคราก (yielding) กำลังแรงดัดกระทำ (M_n) สามารถคำนวณได้จาก

$$M_n = M_p = F_y Z \quad (2.28)$$

2. ลักษณะการวิบัติจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) กำลังแรงดัดกระทำ (M_n) สามารถคำนวณได้จาก

- ก. หน้าตัดอัดแน่น ($\lambda \leq \lambda_p$) ไม่ต้องพิจารณา

- ข. หน้าตัดไม่อัดแน่น ($\lambda_p < \lambda < \lambda_r$)

$$M_n = \left[\frac{0.021E}{\lambda} + F_y \right] S \quad (2.29)$$

- ค. หน้าตัดชะลูด ($\lambda > \lambda_r$)

$$M_n = F_{cr} S = \frac{0.33E}{\lambda} S \quad (2.30)$$

โดยที่ $\lambda = D/t$

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก กก. ต่อ ซม.²

F_y = กำลังคราก กก. ต่อ ซม.²

S = I/C = โมดูลัสหน้าตัดรอบแกนสะเทิน ซม.³

Z = โมดูลัสพลาสติก ซม.³

D = เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก ซม.

t = ความหนา ซม.

2.2.2.3 การออกแบบของค้ำอาคารรับแรงอัดและแรงดัด

การออกแบบของค้ำอาคารที่รับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.31 และสมการที่ 2.32 [5]

เมื่อ $P_r/P_c \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (2.31)$$

เมื่อ $P_r/P_c < 0.2$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (2.32)$$

- โดยที่ P_r = กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่ต้องการ กก.
 P_c = กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ = P_n/Ω_c กก. (สำหรับ ASD)
 Ω_c = ตัวคูณความปลอดภัย = 1.67
 M_r = กำลังแรงดัดที่ต้องการ กก.-ชม.
 M_c = กำลังแรงดัดที่สามารถรับได้ = M_n/Ω_b กก.-ชม. (สำหรับ ASD)
 Ω_b = ตัวคูณความปลอดภัย = 1.67

2.2.2.4 กำลังแรงบิดเหล็กกลวง (HSS)

ข้อกำหนด AISC [14] ได้กำหนดกำลังขององค์อาคารภายใต้แรงบิด ดังสมการที่ 2.33

$$T_c = T_n/\Omega_t \quad (2.33)$$

- โดยที่ T_c = กำลังแรงบิดที่สามารถรับได้ กก.-ชม.
 T_n = กำลังแรงบิดระบุ = $F_{cr}C$ กก.
 C = ค่าคงที่การบิดของเหล็กกลวง ชม.³
 F_{cr} = หน่วยแรงบิดวิกฤต กก. ต่อ ชม.²
 Ω_t = ตัวคูณความปลอดภัย = 1.67

สำหรับเหล็กกลมกลวง (HSS) หน่วยแรงบิดวิกฤต (F_{cr}) สามารถคำนวณได้จากค่าที่มากกว่าของสมการที่ 2.34 และมีค่าไม่เกิน $0.6F_y$ ส่วนค่าคงที่การบิดของเหล็กกลมกลวง (C) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.35 [5]

$$F_{cr} = \text{Max} \left[\frac{1.23E}{\sqrt{L/D}(D/t)^{5/4}}, \frac{0.6E}{(D/t)^{3/2}} \right] \leq 0.6F_y \quad (2.34)$$

$$C = \pi(D - t)^2 t / 2 \quad (2.35)$$

โดยที่ L = ความยาว ชม.
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก ชม.

2.2.2.5 การออกแบบคานรับแรงเฉือน

ข้อกำหนด AISC [14] ได้กำหนดกำลังขององค์อาคารภายใต้แรงเฉือน ดังสมการที่ 2.36

$$V_a = V_n / \Omega_v \quad (2.36)$$

โดยที่ V_a = กำลังแรงเฉือนใช้งานที่ต้องการ กก.
 V_u = กำลังแรงเฉือนปรับค่าที่ต้องการ กก.
 V_n = กำลังแรงเฉือนระบุ กก.
 Ω_v = ตัวคูณความปลอดภัย = 1.67

สำหรับเหล็กกลมกลวง (HSS) กำลังแรงเฉือนระบุ (V_n) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.37 และหน่วยแรงวิกฤต (F_{cr}) สามารถคำนวณได้จากค่าที่มากกว่าของสมการที่ 2.38 และมีค่าไม่เกิน $0.6F_y$

$$V_n = F_{cr} A_g / 2 \quad (2.37)$$

$$F_{cr} = \text{Max} \left[\frac{1.60E}{\sqrt{L_v/D}(D/t)^{5/4}}, \frac{0.78E}{(D/t)^{3/2}} \right] \leq 0.6F_y \quad (2.38)$$

โดยที่ A_g = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ชม.²
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก ชม.

L_v = ระยะระหว่างค่าแรงเฉือนสูงสุดกับศูนย์ ชม.
 t = ความหนา ชม.

2.2.2.6 เหล็กกลมกลวงภายใต้แรงบิด แรงเฉือน แรงดัด และแรงตามแนวแกนกระทำร่วมกัน

การออกแบบของค้ำอาคารที่รับแรงบิด แรงเฉือน แรงดัด และแรงตามแนวแกนกระทำพร้อมกันจะต้องออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนด AISC [14] โดย

เมื่อ $T_r \leq 0.2T_c$ ไม่ต้องคำนึงถึงแรงบิด โดยที่ T_r เท่ากับ แรงบิดที่ใช้ในการออกแบบ

เมื่อ $T_r > 0.2T_c$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.39

$$\left(\frac{P_r}{P_c} + \frac{M_r}{M_c} \right) + \left(\frac{V_r}{V_c} + \frac{T_r}{T_c} \right)^2 \leq 1.0 \quad (2.39)$$

โดยที่ P_r = กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่ต้องการ กก.
 P_c = กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ กก.
 M_r = กำลังแรงดัดที่ต้องการ กก.-ชม.
 M_c = กำลังแรงดัดที่สามารถรับได้ กก.-ชม.
 V_r = กำลังแรงเฉือนใช้งานที่ต้องการ กก.
 V_c = กำลังแรงเฉือนที่สามารถรับได้ กก.
 T_r = กำลังบิดใช้งานที่ต้องการ กก.-ชม.
 T_c = กำลังบิดที่สามารถรับได้ กก.-ชม.

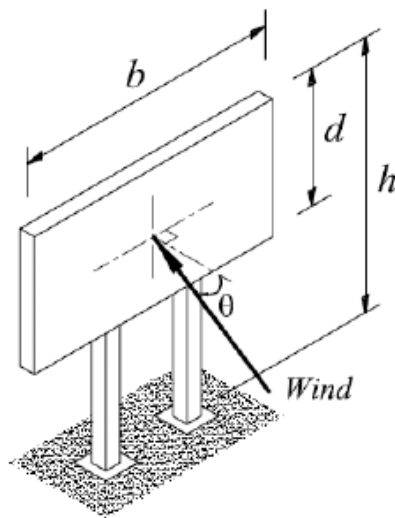
2.3 หน่วยแรงลมตามมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยพ.1311-50

ในปี พ.ศ. 2550 กรมโยธาธิการและผังเมือง ได้ประกาศใช้ มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (มยพ. 1311-50) เพื่อยกระดับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงลมภายในประเทศไทยให้ทันสมัยและมีความถูกต้องสมบูรณ์ทัดเทียมกับมาตรฐานสากล มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (มยพ.1311-50) คำนึงถึงความเร็วลมอ้างอิงในเขตต่าง ๆ ลักษณะภูมิประเทศ รูปร่างของอาคาร คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร รวมทั้งได้กำหนดวิธีการ

คำนวณแรงลมสำหรับป้ายโฆษณาและค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณหน่วยแรงลมป้ายโฆษณาไว้โดยเฉพาะ [3]

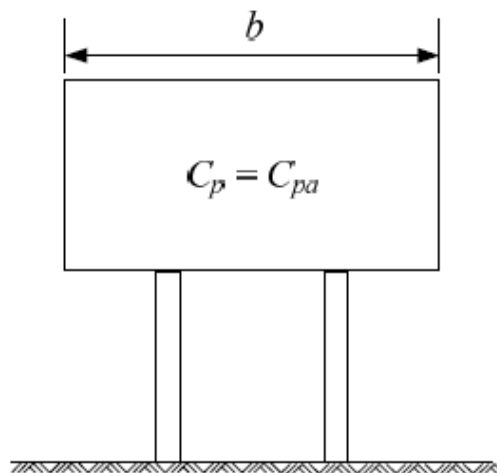
2.3.1 รายละเอียดแรงลมที่กระทำกับป้ายโฆษณา

1. ป้ายและกำแพงต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงลมทั้งในกรณีที่ทิศทางลมตั้งฉากกับแผ่นป้าย ($\theta = 0^\circ$ ในรูปที่ 2.7) และในกรณีที่ทิศทางลมทำมุมเฉียง 45° กับแผ่นป้าย ($\theta = \pm 45^\circ$ ในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9) [3]



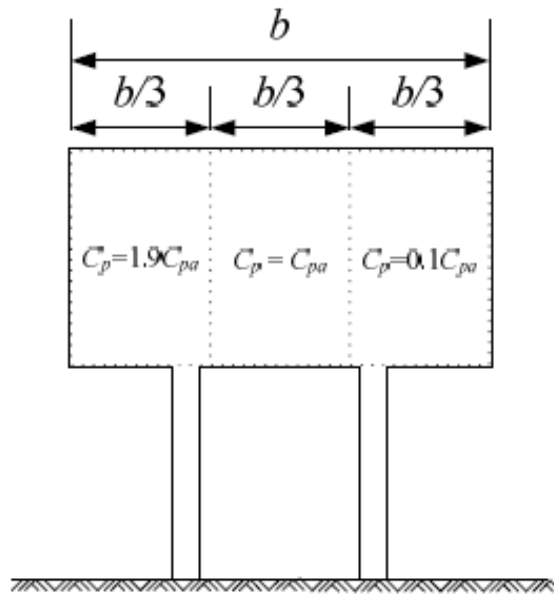
รูปที่ 2.6 สัดส่วนรูปร่างของป้ายและทิศทางลม (θ) [3]

(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)

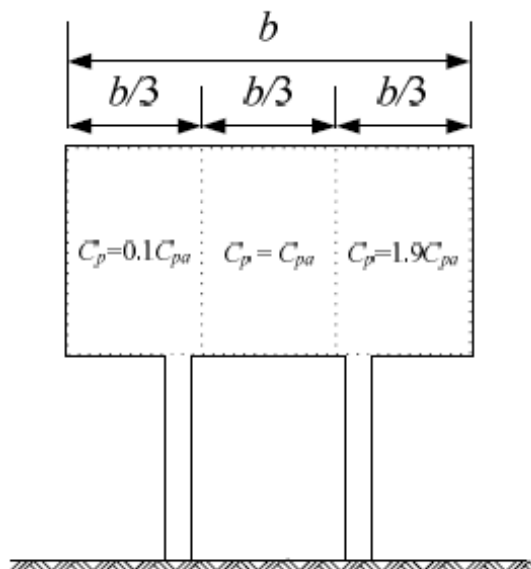


รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ C_p ในกรณีที่ทิศทางลมตั้งฉากกับแผ่นป้าย ($\theta = 0^\circ$) [3]

(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)



รูปที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์ C_p ในกรณีขอบด้านซ้ายของป้ายชี้เข้าหาลม ($\theta = +45^\circ$) [3]
(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)



รูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ C_p ในกรณีขอบด้านขวาของป้ายชี้เข้าหาลม ($\theta = -45^\circ$) [3]
(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)

2. หน่วยแรงลมสุทธิ ซึ่งรวมหน่วยแรงลมทั้งด้านดันลม และด้านท้ายลม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.40

$$p = I_w q C_e C_g C_p \quad (2.40)$$

- โดยที่ p = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า (equivalent static wind pressure) กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายนอกอาคาร
- I_w = ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม ตามตารางที่ 2.6
- q = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (reference velocity pressure)
- C_e = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (exposure factor)
- C_g = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (gust effect factor)
- C_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำ จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนรูปร่างของป้ายทิศทางลมและตำแหน่งบนพื้นที่แผ่นป้าย

ตารางที่ 2.6 ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม, I_w [3]

(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)

ประเภทความสำคัญของอาคาร	ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม	
	สถานะจำกัดด้านกำลัง	สถานะจำกัดด้านการใช้งาน
น้อย	0.8	0.75
ปกติ	1	0.75
มาก	1.15	0.75
สูงมาก	1.15	0.75

3. ในกรณีทิศทางลมตั้งฉากกับแผ่นป้าย ($\theta = 0^\circ$) ค่าสัมประสิทธิ์ C_p มีค่าสม่ำเสมอเท่ากันทั่วทั้งพื้นป้าย (รูปที่ 2.6) และมีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์เฉลี่ย C_{pa} ดังแสดงในตารางที่ 2.7

4. ในกรณีที่ทิศทางลมทำมุมเฉียง 45° กับแผ่นป้าย ($\theta = \pm 45^\circ$) ค่าสัมประสิทธิ์ C_p มีค่าไม่สม่ำเสมอ โดยค่า C_p จะเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยถึง 90% ในบริเวณขอบที่หันเข้าหาลม และค่า C_p จะลดลงจากค่าเฉลี่ยถึง 90% ในบริเวณที่ขอบอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9

5. หน่วยแรงลมสุทธิ ณ ทุกๆ ตำแหน่งบนแผ่นป้ายมีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นป้ายในทุกๆ กรณี ($\theta = 0^\circ$ หรือ $\theta = \pm 45^\circ$)

6. ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ย C_{pa} ในทุกกรณี ($\theta = 0^\circ$ หรือ $\theta = \pm 45^\circ$) มีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วน (b/d) และ อัตราส่วน (d/h) ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย, C_{pa} [3]

(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)

อัตราส่วน d/h	อัตราส่วน b/d							
	≤ 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	1.6	1.50	1.45	1.40	1.35	1.35	1.35	1.30
0.9	1.6	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

* กรณีของกำแพงหรือป้ายที่ตั้งขึ้นมาจากพื้น

2.3.2 หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q)

1. หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม สามารถคำนวณได้จาก

$$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 \quad (2.41)$$

โดยที่ q = หน่วยแรงลมอ้างอิง นิวตันต่อตารางเมตร

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

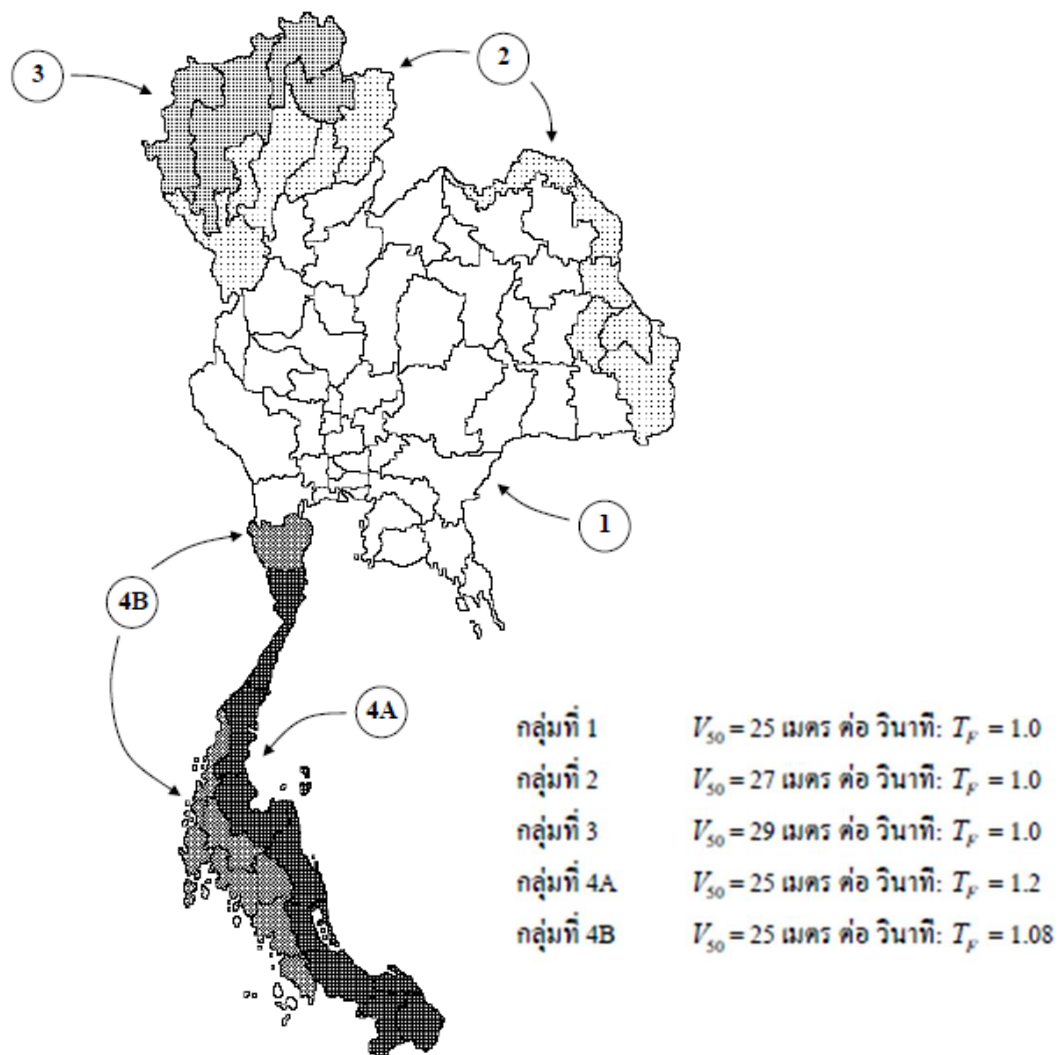
$\bar{V}$ = ความเร็วลมอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดินในสภาพภูมิประเทศเปิดโล่ง สำหรับคาบเวลากลับ (return period) 50 ปี (V_{50})

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

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

โดยค่า V_{50} และ T_F แสดงในรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 แสดงอาณาเขตบริเวณโดยสังเขปของแต่ละกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง และตารางที่ 2.8 จำแนก 76 จังหวัดของประเทศไทยตามกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง โดยแบ่งเป็นตารางย่อยสำหรับแต่ละภาคของ ประเทศ โดยทั่วไปพื้นที่ทั่วทั้งจังหวัดจะจัดอยู่ในกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงเดียวกัน ยกเว้นจังหวัดตาก จังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่มีการแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงตามอำเภอ ค่า ประกอบได้ฝุ่น (T_F) ให้ใช้กับอาคารประเภทความสำคัญสูงมากดังตารางที่ 2.9 ส่วนอาคารประเภท อื่น การใช้ค่าประกอบดังกล่าวให้เป็นไปตามดุลยพินิจของผู้คำนวณออกแบบโครงสร้าง



รูปที่ 2.10 แผนที่การแบ่งกลุ่มความเร็วอ้างอิง ($\bar{V}$) [3]

(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)

ตารางที่ 2.8 การจำแนกกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง [3]

(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)

กลุ่มจังหวัดในภาคเหนือ	
จังหวัด	กลุ่มที่
1. กำแพงเพชร	1
2. เชียงใหม่	3
3. เชียงราย	3
4. ตาก	1
ก. อำเภออุ้มผาง	
ข. บริเวณอื่น ๆ	
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

กลุ่มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	
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. ปทุมธานี	1
9. อยุธยา	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. อุดรธานี	1
22. อ่างทอง	1

ตารางที่ 2.8 การจำแนกกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง (ต่อ) [3]

(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)

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. อุตรดิตถ์	1
18. อำนาจเจริญ	2
19. อุบลราชธานี	2

กลุ่มจังหวัดในภาคใต้	
จังหวัด	กลุ่มที่
1. กระบี่	4B
2. ชุมพร	4A
3. ตรัง	4B
4. นครศรีธรรมราช ก. อำเภอเมือง อำเภอขนอม อำเภอลิขิต อำเภอท่าศาลา อำเภอพิปูน อำเภอพรหมคีรี อำเภอลานสกา อำเภออ่อนพิบูลย์ 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 อำเภอกาญจนาดิษฐ์ อำเภอดอนสัก อำเภอบ้านนาเดิม อำเภอบ้านนาสาร อำเภอเกาะสมุย อำเภอเกาะพะงัน ข. บริเวณอื่นๆ	4A 4B

ตารางที่ 2.9 การจำแนกประเภทอาคารตามความสำคัญต่อสาธารณชน สำหรับพิจารณาค่า (T_F) [3]
(ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550)

ประเภทของอาคาร	ประเภทความสำคัญ
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่มีปัจจัยเสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ค่อนข้างน้อยเมื่อเกิดการพังทลายของอาคารหรือส่วนโครงสร้างนั้นๆ เช่น - อาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร - อาคารชั่วคราว - อาคารเก็บของเล็ก ๆ ซึ่งไม่มีความสำคัญ	น้อย
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่ไม่จัดอยู่ในอาคารประเภท ความสำคัญน้อยมากและสูงมาก	ปกติ
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่หากเกิดการพังทลาย จะเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสาธารณชนอย่างมาก เช่น - อาคารที่เป็นชุมนุมในพื้นที่หนึ่งๆ มากกว่า 300 คน - โรงเรียนประถมหรือมัธยมศึกษาที่มีความจุมากกว่า 250 คน - มหาวิทยาลัยหรือวิทยาลัยที่มีความจุมากกว่า 500 คน - สถานรักษาพยาบาลที่มีความจุคนไข้มากกว่า 50 คน แต่ไม่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - เรือนจำและสถานกักกันโทษ	มาก
อาคารและส่วนโครงสร้างที่มีความจำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชนเป็นอย่างมาก หรืออาคารที่จำเป็นต่อการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุเป็นอย่างมาก เช่น - โรงพยาบาลที่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิง และโรงเก็บรถฉุกเฉินต่างๆ - โรงไฟฟ้า - โรงผลิตน้ำประปา ถังเก็บน้ำ และสถานีสูบน้ำที่มีความดันสูงสำหรับการดับเพลิง - อาคารศูนย์สื่อสาร อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย - ท่าอากาศยาน ศูนย์บังคับการบิน และโรงเก็บเครื่องบิน ที่ต้องใช้เมื่อเกิดกรณีฉุกเฉิน - อาคารศูนย์บัญชาการแห่งชาติ อาคารหรือส่วนโครงสร้างในส่วนของการผลิต การจัดการ การจัดเก็บ หรือการใช้สารพิษ เช่น เชื้อเพลิง หรือสารเคมี อันก่อให้เกิดการระเบิดขึ้นได้	สูงมาก

2.2.3 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ เป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมให้แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ การคำนวณค่าแรงลมโดยวิธีอย่างง่าย คำนึงถึงสภาพภูมิประเทศเป็น 2 ประเภทดังนี้

- ก. สภาพภูมิประเทศแบบ A เป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่งซึ่งมีอาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้างกระจัดกระจายอยู่ห่างๆ กัน หรือเป็นบริเวณชายฝั่งทะเล ให้คำนวณค่า C_e จากสมการที่ 2.42

$$C_e = \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.2} \geq 0.9 \quad (2.42)$$

- ข. สภาพภูมิประเทศแบบ B เป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือพื้นที่ที่มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดเล็ก ให้คำนวณค่า C_e จากสมการที่ 2.43

$$C_e = 0.7\left(\frac{Z}{12}\right)^{0.3} \geq 0.7 \quad (2.43)$$

โดยที่ Z คือค่าความสูงของอาคาร ณ ตำแหน่งที่พิจารณา หน่วยเป็นเมตร

สภาพภูมิประเทศใดๆ จะจัดอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ B ได้ก็ต่อเมื่อมีลักษณะภูมิประเทศในลักษณะนั้นๆ สม่่าเสมอในทิศทางต้นลมเป็นระยะทางไม่ต่ำกว่า 1 กิโลเมตรหรือ 10 เท่าความสูงของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่า ซึ่งสภาพภูมิประเทศที่ใช้ในการคำนวณนี้ ควรสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศที่แท้จริงในทิศทางลมที่พิจารณา

ข้อยกเว้น อาคารที่มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร และตั้งอยู่ในกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง ($\bar{V} = T_F V_{50}$) ไม่เกิน 25 ม.ต่อวินาที ในรูปที่ 2.10 ให้ใช้เฉพาะสภาพภูมิประเทศแบบ A เท่านั้น

2.3.4 ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (C_g)

ค่าประกอบเนื่องจากผลกระทบการกระโชกของลม คือ อัตราส่วนระหว่างผลของแรงลมสูงสุดต่อผลของแรงลมเฉลี่ย ค่าประกอบ C_g สำหรับวิธีการอย่างง่าย คำนวณได้ดังนี้

- ก. สำหรับหน่วยแรงลมสถิติเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร ให้ใช้เท่ากับ 2.0 ในการออกแบบโครงสร้างหลักด้านทานแรงลม ยกเว้นป้ายและกำแพงให้ใช้เท่ากับ 2.35

- ข. สำหรับหน่วยแรงลมสถิติเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร ให้ใช้เท่ากับ 2.5 ในการออกแบบโครงสร้างรองและผนังภายนอกอาคาร (cladding) ที่มีขนาดเล็ก (ประมาณขนาดหน้าต่าง)

2.4 กฎหมายที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 กฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2527

กฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) [1] ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 ข้อ 17 ในหมวดแรงลม ได้กำหนดค่าหน่วยแรงลมที่กระทำกับอาคารเปลี่ยนแปลงตามความสูงของอาคารเพียงอย่างเดียว ตามตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 หน่วยแรงลมตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) [1]
(ที่มา: กฎกระทรวงฉบับที่ 6, 2527)

ความสูงของอาคาร	หน่วยแรงลม (กก.ต่อ ตร.ม.)
(1) ส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	50
(2) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	80
(3) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	120
(4) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 40 เมตร	160

2.4.2 กฎกระทรวงฉบับที่ 55 (พ.ศ.2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522

กฎกระทรวงฉบับที่ 55 (พ.ศ.2543) [2] ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 ข้อที่ 13 ในหมวด 1 ลักษณะของอาคาร ได้แก่ ป้ายที่ติดตั้งอยู่บนพื้นดินโดยตรงต้องมีความสูงไม่เกินระยะที่วัดจากจุดที่ติดตั้งป้ายไปจนถึงกึ่งกลางถนนสาธารณะที่อยู่ใกล้ป้ายนั้นที่สุด และมีความยาวของป้ายไม่เกิน 32 เมตร

2.4.3 ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องการควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ.2544

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องการควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ.2544 [4] แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร (ฉบับที่ 2) ข้อ 36 หมวด 3 ลักษณะต่างๆ ของอาคาร ได้แก่ ป้ายที่ติด

ตั้งอยู่บนพื้นดินโดยตรง ต้องมีความสูงไม่เกินระยะที่วัดจากจุดที่ติดตั้งป้ายไปจนถึงกึ่งกลางถนนสาธารณะ และสูงไม่เกิน 30 เมตร มีความยาวไม่เกิน 32 เมตร และต้องห่างจากที่ดินต่างเจ้าของไม่น้อยกว่า 4 เมตร

2.5 การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุวรรณสาม คิริวิเชียร [12] ได้ทำการวิจัยเรื่อง แรงลมสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้ายโฆษณา เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงลมสำหรับออกแบบป้ายโฆษณา โดยใช้ กฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) มาตรฐาน Uniform Building Code 1994 (UBC 1994) มาตรฐาน National Building Code of Canada 1995 (NBC 1995) มาตรฐาน American Society of Civil Engineers 1998 (ASCE 7-98) และ มาตรฐาน Australian/New Zealand Standard 2002 (AS/NZS 1170.2-2002) ซึ่งมาตรฐาน UBC 1994, NBC 1995, ASCE 7-98 และ AS/NZS 1170.2-2002 จะคำนึงถึง ลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะภูมิอากาศ ความสูงของโครงสร้าง ความเร็วลมกระโชก ความสำคัญของโครงสร้าง ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมและทิศทางของลมที่เข้ามาปะทะกับป้าย ส่วนกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ค่าหน่วยแรงลมที่กระทำกับอาคารเปลี่ยนแปลงตามความสูงเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยอื่น

งานวิจัยนี้ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับป้ายที่มีขนาดกว้าง 32 เมตร สูง 13 เมตร และสูงจากพื้นดิน 30 เมตร แล้วเปรียบเทียบผลของแต่ละมาตรฐานพบว่าที่ลักษณะภูมิประเทศแบบศูนย์กลางเมือง และชนเมืองหรือชนบท หน่วยแรงลมตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) จะมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน UBC 1994, AS/NZS 1170.2-2002, ASCE 7-98 และ NBC 1995 แต่เมื่อลักษณะภูมิประเทศเป็นแบบพื้นที่โล่งมีสิ่งกีดขวางน้อยและพื้นที่ราบเรียบ ชายฝั่งทะเล หน่วยแรงลมตามมาตรฐาน UBC 1994, AS/NZS 1170.2-2002, ASCE 7-98 และ NBC 1995 จะมีค่ามากกว่าหน่วยแรงลมตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ซึ่งมีผลมาจากปัจจัยที่ใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงลมตามมาตรฐาน UBC 1994, AS/NZS 1170.2-2002, ASCE 7-98 และ NBC 1995 จะขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศด้วย แต่สำหรับกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ไม่ได้คำนึงถึงลักษณะภูมิประเทศเนื่องจากไม่ได้มีกำหนดไว้ นอกจากนี้มาตรฐาน AS/NZS 1170.2-2002 และ ASCE 7-98 ได้กำหนดให้มีการออกแบบต้านทานแรงบิด (Torsion) เพราะว่าผลรวมของแรงลัพธ์นั้นไม่ได้กระทำที่จุดกึ่งกลางของแผ่นป้าย เนื่องมาจากแรงลมที่กระทำกับแผ่นป้ายนั้นไม่ได้กระทำตั้งฉากกับแผ่นป้ายทำให้แรงลัพธ์ไม่กระทำที่บริเวณกึ่งกลางของแผ่นป้ายทำให้เกิดระยะเอียงศูนย์รอบแนวแกนดิ่ง เท่ากับ 0.2 เท่าของความกว้างแผ่นป้าย ซึ่งกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ไม่ได้กำหนดให้คำนวณผลเนื่องจากแรงบิด (Torsion) สำหรับมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยพ.1311-50 (พ.ศ.2550) [3] ได้คำนึงถึง ความเร็วลมอ้างอิงในเขตต่างๆ ลักษณะภูมิประเทศ รูปร่างอาคาร และ

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร และมีมาตรฐานสำหรับการคำนวณแรงลมสำหรับป้ายโฆษณา โดยเฉพาะ ซึ่งคำนึงถึงผลของของแรงบิด (Torsion) รวมไว้ด้วย

ชรินทร์ นิลดอนขวาง และคณะ [12] ทำการศึกษาวิเคราะห์โครงป้ายเหล็กโฆษณา ภายใต้อาคารภายใต้แรงลมที่ได้จากการเก็บข้อมูลความเร็วลมในจังหวัดเชียงใหม่เป็นเวลา 36 ปีเพื่อนำมาคำนวณหาความเร็วลมไว้แรงเสียดทาน โดยสมการยกกำลัง (Power Law) แล้วจึงคำนวณหาความเร็วลมที่ใช้ออกแบบ เพื่อนำมาวิเคราะห์กับโครงป้ายโดยใช้โปรแกรม MICRO FEAP หาหน่วยแรง (Stress) ที่กระทำในองค์อาคารของตัวอย่างโครงป้ายที่อยู่ในภาคเหนือ โดยใช้แรงลมที่เกิดขึ้นจริงในที่ตั้งของโครงป้ายและแรงลมภายใต้พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 จากการวิเคราะห์พบว่าหน่วยแรง (Stress) ในองค์อาคารส่วนใหญ่มากกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress)