



การออกแบบโครงสร้างเหล็ก โดยวิธี LRFD/ASD

ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16

Structural Steel Design by LRFD/ASD Method

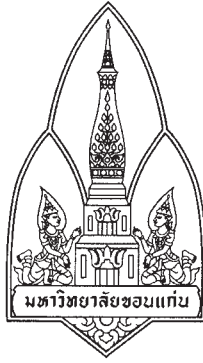
According to ANSI/AISC 360-16 Standard



ศาสตราจารย์วิระ ทอสกุลไท

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



การออกแบบโครงสร้างเหล็ก โดยวิธี LRFD/ASD ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16

ศาสตราจารย์วีระ หอสกุลไท

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ได้รับทุนสนับสนุนการผลิตตำรา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ลำดับที่ 195

โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2565

ISBN (e-book) 978-616-438-706-5

วีระ หอสกุลไท.

การออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธี LRFD/ASD ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 /

วีระ หอสกุลไท -- ขอนแก่น : สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2565.

755 หน้า : ภาพประกอบ

1. โครงสร้างเหล็ก -- การออกแบบและการสร้าง. 2. การออกแบบโครงสร้าง. 3. การออกแบบ
ตัวค้ำยันหน้าบันทุก. 4. การออกแบบกำลังที่ยอมให้. (1) มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. (2) ชื่อเรื่อง.

TA684 ว842

ISBN (e-book) 978-616-438-706-5

จัดทำโดย ศูนย์นวัตกรรมการเรียนการสอน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ราคา 650 บาท

สงวนลิขสิทธิ์ โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2565

คำนำ

หนังสือการออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธี LRFD/ASD ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 เล่มนี้ได้รับทุนสนับสนุนการผลิตตำราใหม่ พ.ศ. 2562 จากศูนย์นวัตกรรมการเรียนการสอน มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อให้ได้ตำราที่มีเนื้อหาทันสมัยและสอดคล้องกับทฤษฎีที่เปลี่ยนไป ผู้เขียนจึงได้เขียนหนังสือการออกแบบโครงสร้างเหล็กให้สอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบที่เปลี่ยนไปและอ้างอิงมาตรฐานล่าสุดของ ANSI/AISC 360-16 ซึ่งในอดีตการออกแบบโครงสร้างเหล็กได้ใช้วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD) ต่อมาได้เปลี่ยนเป็นวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD) เพื่อให้ได้พฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างเหล็กที่ถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดและสอดคล้องกับวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor, LRFD) ที่กำหนดในมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16

หนังสือการออกแบบโครงสร้างเหล็กเล่มนี้มีเนื้อหาส่วนแรกเป็นการแนะนำคุณสมบัติเหล็ก รูปพรรณและเหล็กโครงสร้าง วิธีการออกแบบ น้ำหนักบรรทุกกระทำต่ออาคารตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 6 ออกตาม พรบ. ความคุมอาคาร พ.ศ. 2522 แรงลมได้แนะนำวิธีการวิเคราะห์หน่วยแรงลม สถิติเทียบเท่าโดยวิธีอย่างง่ายตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 และแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว ตามกฎกระทรวง พ.ศ. 2564 ใช้วิธีการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 ส่วนที่ 2 ได้แยกเนื้อหาตามพฤติกรรมการรับแรงและประเภทส่วนของโครงสร้าง ดังนี้ องค์อาคารรับแรงดึง รอยต่อสลักเกลียว รอยต่อเชื่อม องค์อาคารรับแรงอัด คาน ส่วนของโครงสร้างรับแรงดัด และคานแผ่นเหล็กประกอบ และองค์อาคารรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนร่วมกัน (คาน-เสา)

หนังสือเล่มนี้ใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาการออกแบบโครงสร้างเหล็ก ตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และยังเหมาะสำหรับนักศึกษา วิศวกรที่ใช้ศึกษาเพิ่มเติมและประกอบในการทำงาน

ศาสตราจารย์วีระ หอสกุลไท

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
บทที่ 1 เหล็กโครงสร้าง	1 – 25
1.1 บทนำ	1
1.2 เหล็กโครงสร้าง	3
1.3 เหล็กรูปพรรณตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	18
1.4 เอกสารอ้างอิง	23
บทที่ 2 วิธีการออกแบบและน้ำหนักบรรทุก	27 – 116
2.1 บทนำ	27
2.2 แนวคิดการออกแบบโครงสร้างเหล็ก	28
2.3 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้าง	41
2.4 แรงลม	45
2.5 แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว	75
2.6 น้ำหนักบรรทุกกระแทก	111
2.7 แบบฝึกหัด	112
2.8 เอกสารอ้างอิง	115
บทที่ 3 องค์อาคารรับแรงดึง	117 – 174
3.1 บทนำ	117
3.2 กำลังรับแรงดึง	117
3.3 การออกแบบองค์อาคารรับแรงดึง	140
3.4 องค์อาคารประกอบรับแรงดึง	145
3.5 แท่งเหล็กกลมรับแรงดึง	150
3.6 องค์อาคารยึดด้วยสลัก	157
3.7 ท่อนรูหมุดตาไก่	164
3.8 แบบฝึกหัด	169
3.9 เอกสารอ้างอิง	174

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 รอยต่อสลักเกลียว	175 – 243
4.1 บทนำ	175
4.2 ตัวยึด	176
4.3 ประเภทของรอยต่อสลักเกลียว	183
4.4 ประเภทของรอยต่อ	186
4.5 รอยต่อสลักเกลียวแบบรับแรงแบกทาน: กรณีรับแรงดึงตรงศูนย์	189
4.6 รอยต่อสลักเกลียวแบบรับแรงแบกทาน: กรณีรับแรงเฉือนเยื้องศูนย์	207
4.7 รอยต่อสลักเกลียวแบบรับแรงแบกทาน: กรณีรับแรงดึงและแรงเฉือนร่วมกัน	219
4.8 รอยต่อสลักเกลียวแบบเลื่อนวิกฤติ: กรณีรับแรงดึงตรงศูนย์	226
4.9 รอยต่อสลักเกลียวแบบเลื่อนวิกฤติ: กรณีรับแรงดึงและแรงเฉือนร่วมกัน	232
4.10 แบบฝึกหัด	237
4.11 เอกสารอ้างอิง	243
บทที่ 5 รอยต่อเชื่อม	245 – 326
5.1 บทนำ	245
5.2 คำหั้นในรอยเชื่อม	248
5.3 การตรวจสอบรอยเชื่อม	252
5.4 ประเภทของรอยต่อ	257
5.5 ประเภทของรอยเชื่อม	260
5.6 สัญลักษณ์มาตรฐานของงานเชื่อม	261
5.7 ลวดเชื่อม	263
5.8 กำลังรับแรงของรอยต่อเชื่อม	268
5.9 รอยเชื่อมแบบพอก	269
5.10 รอยเชื่อมแบบบากร่อง	301
5.11 รอยต่อเชื่อมแบบอุดรูกลมและอุดร่อง	314
5.12 แบบฝึกหัด	320
5.13 เอกสารอ้างอิง	326

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 องค์อาคารรับแรงอัด	327 – 414
6.1 บทนำ	327
6.2 กำลังรับแรงขององค์อาคารรับแรงอัด	328
6.3 กำลังรับแรงอัดและการวิบัติของเสา	335
6.4 การออกแบบขององค์อาคารรับแรงอัด	347
6.5 องค์อาคารที่ไม่มีชิ้นส่วนชะลูดวิบัติแบบโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัด	349
6.6 องค์อาคารและเหล็กฉากเดี่ยวที่ไม่มีชิ้นส่วนชะลูดโก่งเดาะ เนื่องจากแรงบิด และเนื่องจากแรงดัด-แรงบิดร่วมกัน	367
6.7 เหล็กฉากเดี่ยวที่ไม่มีชิ้นส่วนชะลูดรับแรงอัดตามแนวแกน	378
6.8 องค์อาคารประกอบ	385
6.9 องค์อาคารรับแรงอัดที่มีชิ้นส่วนชะลูด	405
6.10 แบบฝึกหัด	411
6.11 เอกสารอ้างอิง	414
 บทที่ 7 คาน	 415 – 542
7.1 บทนำ	415
7.2 พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานในระนาบ	416
7.3 การวิบัติของคานเหล็กเนื่องจากแรงดัด	421
7.4 กำลังรับแรงของคานเหล็ก	428
7.5 การโก่ง	433
7.6 เหล็กหน้าตัด I มีหน้าตัดแบบคอมแพคสมมาตร 2 แกน และเหล็กทรง C ดัดรอบแกน x	435
7.7 เหล็กหน้าตัด I สมมาตร 2 แกน มีแผ่นเอวคอมแพค และแผ่นปีกไม่คอมแพคหรือชะลูดดัดรอบแกน x	452
7.8 เหล็กหน้าตัด I อื่น ๆ สมมาตร 2 แกนและแกนเดียวมีแผ่นเอวคอมแพค หรือไม่คอมแพคดัดรอบแกน x	457
7.9 เหล็กหน้าตัด I สมมาตร 2 แกนและแกนเดียว มีแผ่นเอวชะลูด ดัดรอบแกน x	470

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.10 เหล็กหน้าตัด I และเหล็กราง C ตัดรอบแกน y	479
7.11 หน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง (HSS) และหน้าตัดกล่อง (Box sections)	485
7.12 ท่อกลม	494
7.13 เหล็ก T และเหล็กฉากคู่มือแรงกระทำในระนาบของแกนสมมาตร	499
7.14 เหล็กฉากเดี่ยว	510
7.15 เหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมตันและเหล็กกลมตัน	518
7.16 การตัด 2 แกน	523
7.17 แบบฝึกหัด	535
7.18 เอกสารอ้างอิง	542
บทที่ 8 ส่วนโครงสร้างรับแรงดัดและคานแผ่นเหล็กประกอบ	543 – 636
8.1 บทนำ	543
8.2 เหล็กหน้าตัด I รับแรงแบบจุด	544
8.3 พฤติกรรมการงัด (Prying action)	554
8.4 แผ่นเหล็กรองคาน	568
8.5 การเสริมคานด้วยแผ่นเหล็กประกบ	580
8.6 คานแผ่นเหล็กประกอบ	586
8.7 แผ่นเหล็กตั้งเสริมกำลัง	599
8.8 รอยต่อต้านทานโมเมนต์ดัด	619
8.9 แบบฝึกหัด	632
8.10 เอกสารอ้างอิง	636
บทที่ 9 องค์อาคารรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนร่วมกัน	637 – 718
9.1 บทนำ	637
9.2 เสาคานในโครงข้อแข็ง	639
9.3 องค์อาคารที่มีแกนสมมาตร 2 แกนและแกนเดียวรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนร่วมกัน	652
9.4 โมเมนต์ดัดลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 ขององค์อาคารคาน-เสา	661

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
9.5 วิธีวิเคราะห์ลำดับที่ 2 โดยประมาณ	662
9.6 แผ่นเหล็กรองรับฐานเสาเหล็ก	686
9.7 แบบฝึกหัด	715
9.8 เอกสารอ้างอิง	718
 ภาคผนวก ก	 719
ภาคผนวก ข	722
ภาคผนวก ค	724
ภาคผนวก ง	726
ภาคผนวก จ	731
ภาคผนวก ฉ	735
ภาคผนวก ช	738
ภาคผนวก ซ	740
ภาคผนวก ฌ	744
ภาคผนวก ญ	746
ดัชนี	749
ประวัติผู้เขียน	755

บทที่ 1

เหล็กโครงสร้าง

1.1 บทนำ

เหล็กเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานโครงสร้าง เนื่องจากมีกำลังรับแรงสูง หน้าตัดต่อการรับน้ำหนักต่ำ ง่ายต่อการการดัดแปลงขึ้นรูปและติดตั้ง มีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ใช้ในงานโครงสร้างได้หลากหลาย เช่น อาคาร สะพาน และอาคารระฟ้า เป็นต้น ดังรูปที่ 1.1 และยังมีคุณสมบัติเฉพาะที่โดดเด่น ดังนี้

(1) กำลังรับแรงต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่ใช้ในงานโครงสร้าง ทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

(2) เหล็กมีพฤติกรรมเชิงอีลาสติกใกล้เคียงกับกฎของฮุก (Hooke's law) โดยมีค่าหน่วยแรงพิกัดเส้นตรง (Proportional limit) ใกล้เคียงกับหน่วยแรงคราก (Yield stress, F_y) จึงมีพฤติกรรมการรับแรงใกล้เคียงกับสมมติฐานของการออกแบบ

(3) เหล็กเป็นวัสดุเหนียว (Ductile material) มีการยืดตัวได้มากที่หน่วยแรงดึงประลัยไม่เกิดการวิบัติโดยง่าย เช่น การทดสอบการรับแรงดึงของเหล็กคาร์บอนต่ำ มีช่วงการยืดตัวมากกว่าตำแหน่งหน่วยแรงคราก ซึ่งเป็นตำแหน่งที่หน้าตัดเหล็กเริ่มมีขนาดเล็กลงจนถึงหน่วยแรงดึงขาด (Fracture stress) ในขณะที่วัสดุเปราะ (Brittle material) มีการยืดตัวในช่วงหน่วยแรงครากถึงหน่วยแรงดึงขาดแคบ

(4) เหล็กเป็นวัสดุที่มีความแกร่ง (Toughness) สามารถดูดซับพลังงานไว้ได้อย่างมากไม่เกิดการแตกหักโดยง่าย มีกำลังรับแรงและความเหนียวสูง เมื่อองค์อาคารเหล็กรับแรงจนกระทั่งมีการยืดตัวสูงจะยังคงอยู่ได้โดยไม่เกิดการฉีกขาดแม้ว่าแรงกระทำจะมีค่ามากก็ตาม จึงเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของเหล็กโครงสร้าง ฉะนั้นในระหว่างการผลิตขึ้นรูป (Fabrication) และติดตั้ง (Erection) จึงสามารถดัดงอ ทุบ และเจาะรูได้โดยไม่ปรากฏความเสียหายให้เห็น



(ก) Sydney Harbour Bridge, Australia [1]



(ข) Building [2]



(ค) Burj Khalifa, Dubai, UAE [3]

รูปที่ 1.1 อาคารโครงสร้างเหล็ก

อย่างไรก็ตาม โครงสร้างเหล็กยังมีข้อเสียที่ต้องพิจารณา ะมัดระวัง และป้องกัน ดังนี้

(1) ไม่ทนไฟต้องมีระบบป้องกันเพลิง โดยปกติเหล็กโครงสร้างไม่ติดไฟแต่ส่วนประกอบของอาคารโดยส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่ติดไฟเป็นเชื้อเพลิง เมื่อเกิดเพลิงไหม้ในตัวอาคารจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสเหล็กก็จะทำให้อุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงของเหล็กลดลง ระบบป้องกันเพลิงสำหรับโครงสร้างเหล็กอาจหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน และใช้ระบบฉีดน้ำ (Springer system) เป็นต้น

(2) ไม่ทนต่อการกัดกร่อนหรือเกิดสนิม (Corrosion) เป็นธรรมชาติของโลหะเปลือยสัมผัสกับอากาศและน้ำโดยตรงมักมีความเสี่ยงต่อการเกิดกัดกร่อน แต่อย่างไรก็ตามสามารถป้องกันได้โดยการทาสีหรือใช้เหล็กที่คงทนต่อการกัดกร่อน (Weathering steel)

(3) เกิดการวิบัติแบบเปราะ (Brittle fracture) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำหลายๆ รอบ และอุณหภูมิติดลบ เกิดภายใต้สภาวะหน่วยแรงสามแกน (Triaxial stress condition) และบริเวณที่เกิดหน่วยแรงเข้มข้น (Stress concentration) เป็นต้น

(4) เกิดความล้า (Fatigue) ทำให้กำลังรับแรงของเหล็กลดลง เมื่อองค์อาคารรับแรงกระทำซ้ำสลับไปมาหลายๆ รอบ (Cyclic load) หรือรับแรงดัดผันแปรหลายๆ รอบ

1.2 เหล็กโครงสร้าง (Structural Steel)

โดยทั่วไป เหล็กที่ใช้ในงานโครงสร้างเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) และเหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) ของธาตุเหล็ก (Iron) และคาร์บอน (Carbon) อาจมีการผสมธาตุอื่นเพื่อให้ได้เหล็กกล้าที่มีคุณภาพตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น คาร์บอน (Carbon, C) ให้กำลังและความแข็ง แมงกานีส (Manganese, Mn) ให้ความแข็ง ซิลิกอน (Silicon, Si) ให้กำลัง ตะกั่ว (Lead, Pb) ให้ความอ่อนกลิ้งง่าย นิกเกิล (Nickel, Ni) โครเมียม (Chromium, Cr) และทองแดง (Copper, Cu) ให้ความทนทานต่อการกัดกร่อน เป็นต้น

1.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา (American Iron and Steel Institute, AISI) จำแนกเหล็กกล้าคาร์บอนตามปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในส่วนผสมเป็น 4 ประเภท [4] ได้แก่

(1) **เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel)** หรือเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) มีปริมาณคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 0.30 นิยมใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เนื่องจากมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของวัสดุที่ได้ต่อการประยุกต์ใช้งาน เหล็กกล้าละมุนมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.05 – 0.25 เป็นเหล็กเหนียวสามารถดัดงอได้ง่ายโดยไม่แตกหัก มีกำลังดัดค่อนข้างต่ำง่ายต่อการดัดแปลงขึ้นรูป สามารถเพิ่มความแข็งที่ผิวได้โดยการชุบแข็ง ซึ่งเป็นขบวนการคาร์บูไรซิง (Carburizing) ผลิตเป็นเหล็กโครงสร้างกำลังปกติ

(2) **เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel)** มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.30 – 0.60 มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าละมุน แต่มีกำลังดัดสูงกว่า ผลิตเป็นเหล็กกล้ากำลังสูง (High strength steel) โดยใช้ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.30 – 0.35 ผสมแมงกานีสร้อยละ

0.60 เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.40 – 0.60 และแมงกานีสร้อยละ 0.60 – 1.65 มีกำลังสูง ต้านทานความเสียหายได้ดี ใช้ผลิตเหล็กทางรถไฟ ล้อและเพลารถไฟ

(3) เหล็กกล้าคาร์บอนปริมาณสูง (High carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.60 – 1.00 เมื่อผสมแมงกานีสร้อยละ 0.30 – 0.60 มีความแข็งแรงมาก ใช้ผลิตสปริงและลวดกำลังสูง

(4) เหล็กกล้าคาร์บอนปริมาณสูงมาก (Ultrahigh carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 1.00 – 2.00 มีความแข็งแรงสูงมาก ใช้เพื่อลดขนาดชิ้นงานให้เล็กลง ทำให้น้ำหนักลดลง

1.2.2 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือเหล็กกล้าละมุน อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง (Tensile stress) และความเครียด (Tensile strain) ดังรูปที่ 1.2 เมื่อแท่งเหล็กรับแรงดึงตามแนวแกนทำให้เหล็กเกิดการยืดตัว แบ่งพฤติกรรมการรับแรงและการเสียรูปได้เป็น 4 ช่วง ได้แก่

(1) **ช่วงอีลาสติก (Elastic region)** เป็นช่วงเริ่มต้นที่เหล็กรับแรงดึงยัง不多 อยู่ในช่วงจากจุด O ถึงจุด B ช่วงที่เริ่มต้นจาก O ถึง A มีความสัมพันธ์ของหน่วยแรงแปรผันโดยตรงกับความเครียดได้กราฟเป็นเส้นตรง โดยที่จุด A เป็นพิสัยเส้นตรง (Proportional limit) และความชันของเส้นตรง OA เป็นโมดูลัสอีลาสติก (Modulus of elasticity, E) มีค่าดังสมการ (1.1) จากนั้นกราฟจะเริ่มโค้งขึ้นในช่วงสั้นๆ แต่การยืดตัวยังเป็นอีลาสติก ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดแปรผันไม่เป็นเส้นตรง เป็นช่วงจากจุด A ถึง B โดยที่จุด B เป็นจุดที่เหล็กเริ่มยืดตัวพลาสติกและหลังจากจุดนี้เหล็กจะมีการเสียรูปพลาสติกซึ่งเป็นการเสียรูปถาวร เมื่อเหล็กรับแรงเพิ่ม พื้นที่หน้าตัดเหล็กเริ่มลดลง เรียกจุด B นี้ว่า จุดครากบน (Upper yield point) เกิดหน่วยแรงครากบน (Upper yield stress, σ_u) และเป็นพิสัยอีลาสติก (Elastic limit)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

โดยที่ E = โมดูลัสอีลาสติก, ksc

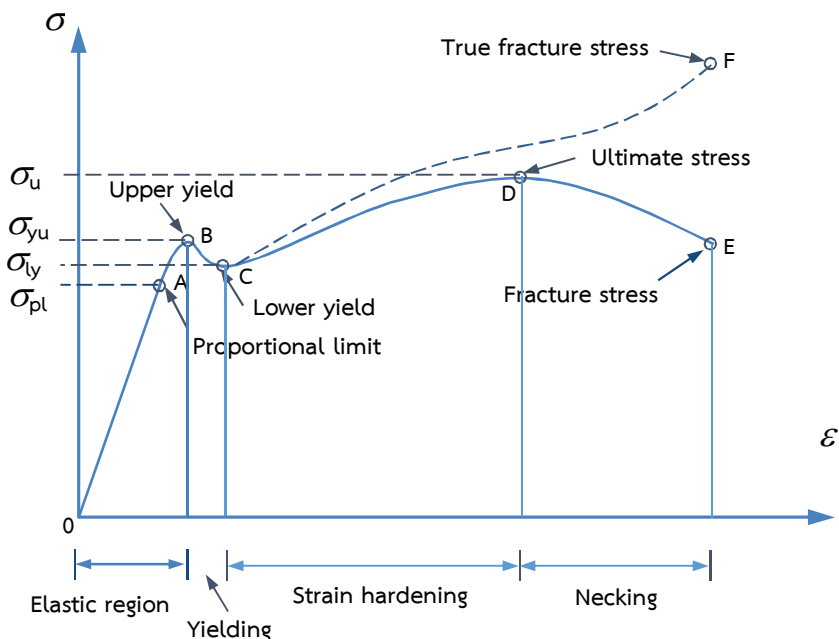
σ = หน่วยแรงดึง, ksc

ϵ = ความเครียดดึง, mm/mm

(2) **ช่วงคราก (Yielding)** ต่อจากช่วงอีลาสติกกราฟเริ่มตกลงในช่วงสั้นๆ ก่อนที่จะโค้งขึ้นอีกครั้ง เป็นช่วงจากจุด B ถึง C และที่จุด C เรียกว่า จุดครากล่าง (Lower yield point) ให้หน่วยแรงครากล่าง (Lower yield stress, σ_{ly}) การเกิดจุดครากบนและจุดครากล่างเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

(3) **ช่วงเกิดความเครียดอย่างมาก (Strain hardening)** ต่อจากช่วงคราก เหล็กจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวรพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดิ่งเล็กลงเรื่อย ๆ อัตราการเพิ่มของหน่วยแรงเพิ่มขึ้นช้ากว่าอัตราการเพิ่มความเครียดจนกระทั่งได้ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่จุด D ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงประลัย (Ultimate stress, σ_u เป็นกราฟช่วง C ถึง D

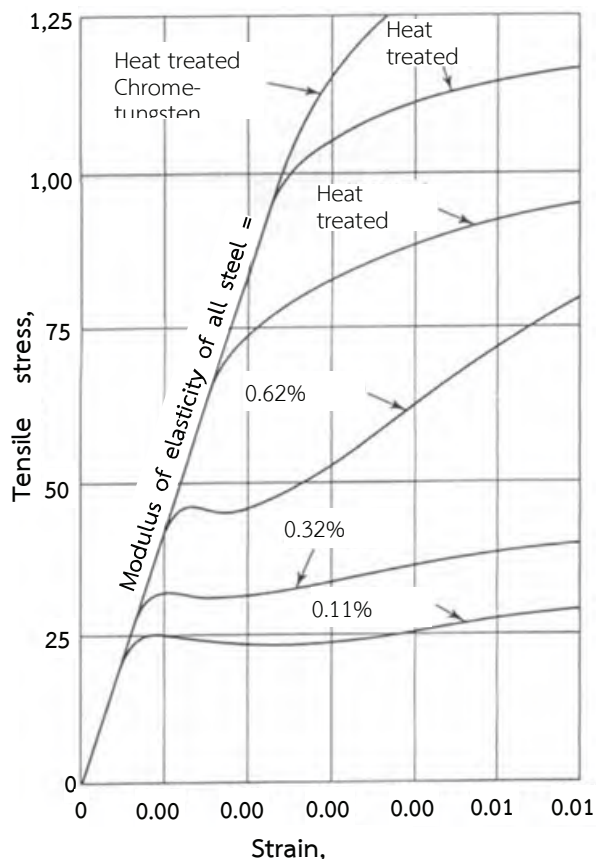
(4) **ช่วงมีส่วนคอด (Necking)** ต่อจากช่วงเกิดความเครียดอย่างมาก หลังจากเหล็กเกิดหน่วยแรงประลัยกราฟเริ่มโค้งลงอย่างรวดเร็ว เหล็กเริ่มมีส่วนคอด (Necking) และหน้าตัดส่วนคอดจะเล็กลงอย่างรวดเร็วขณะที่หน่วยแรงจริง (True stress) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน จนกระทั่งเหล็กขาดออกจากกันในที่สุด เป็นกราฟช่วง D ถึง E ที่จุด E เป็นจุดที่เหล็กขาดมีค่าหน่วยแรงเป็นหน่วยแรงดิ่งขาด (Fracture stress) ขณะที่จุด F เป็นหน่วยแรงดิ่งขาดจริง (True fracture stress)



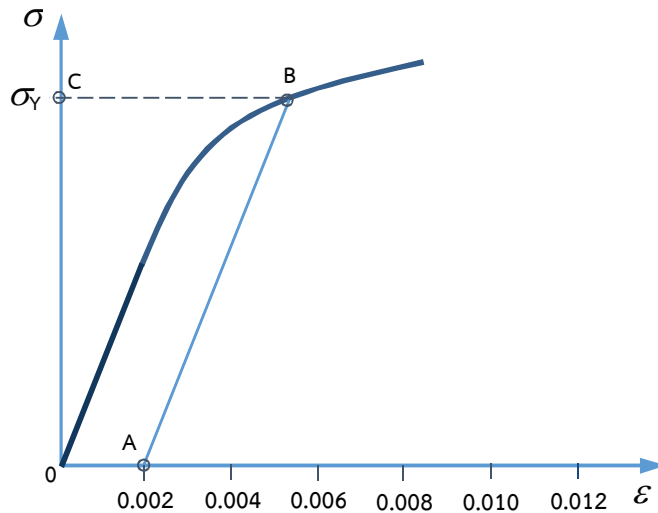
รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

1.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอน

จากรูปที่ 1.3 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนผสมในอัตราที่แตกต่างกันภายใต้การรับแรงดึง จะเห็นว่าเหล็กกล้าคาร์บอนทุกประเภทมีความชันของกราฟในช่วงพิกัดเส้นตรงเท่ากัน ได้กราฟเป็นเส้นตรงในแนวเดียวกัน ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนทุกประเภทมีค่าโมดูลัสอีลาสติกเท่ากัน 200 GPa ($E = 200 \text{ GPa} \approx 2 \times 10^6 \text{ ksc}$) เหล็กกล้าคาร์บอนปริมาณสูงหรือเหล็กกล้าที่มีความแข็งมากจะไม่ปรากฏช่วงครากให้เห็น ในการหาหน่วยแรงครากจะใช้วิธีออฟเซต (Offset method) โดยทั่วไปการหาหน่วยแรงครากของเหล็กโครงสร้างเลือกจุดออฟเซตที่ความเครียดร้อยละ 0.2 (0.2% strain offset) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ดังรูปที่ 1.4 เริ่มต้นที่จุด A บนแกนความเครียด ห่างจากจุด A ที่ความเครียด 0.002 ลากเส้นขนานกับเส้นตรงช่วงพิกัดเส้นตรงไปตัดกับเส้นกราฟที่จุด B จากจุด B ลากเส้นขนานกับแกนความเครียดไปตัดแกนหน่วยแรงที่จุด C จะได้หน่วยแรงคราก



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอน



รูปที่ 1.4 การหาหน่วยแรงครากโดยวิธีออฟเซตที่ความเครียดร้อยละ 0.2

1.2.4 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในการออกแบบ

1) โมดูลัสอีลาสติก

โมดูลัสอีลาสติกหรือโมดูลัสของยัง (Young's modulus) เป็นความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในช่วงพิกัดเส้นตรง ดังสมการ (1.1) โดยทั่วไป $E = 200 \text{ GPa} \approx 2 \times 10^6 \text{ ksc}$

2) โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus of Elasticity, G)

โมดูลัสของแรงเฉือนหรือโมดูลัสความแกร่ง (Modulus of rigidity) เป็นความชันของกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) และความเครียดแรงเฉือน (Shear strain) ดังรูปที่ 1.5 โดยที่ G มีค่าดังสมการ (1.2) และแปรผันตามโมดูลัสอีลาสติก ดังสมการ (1.3)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{..... (1.2)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{..... (1.3)}$$

โดยที่ G = โมดูลัสของแรงเฉือน, ksc

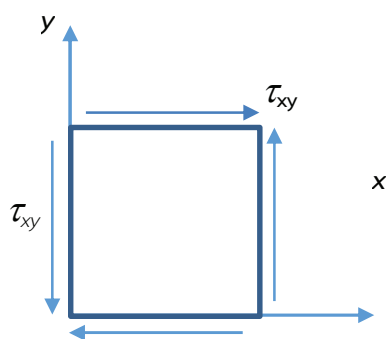
τ = หน่วยแรงตึง, ksc

γ = ความเครียดแรงเฉือน

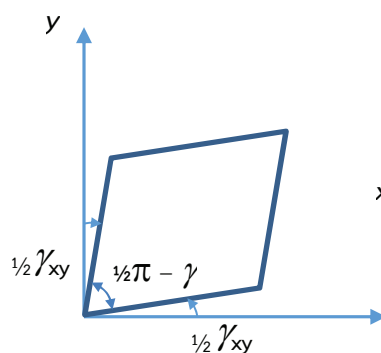
E = โมดูลัสอีลาสติก, ksc

ν = อัตราส่วนพัวซอง (Poisson's ratio)

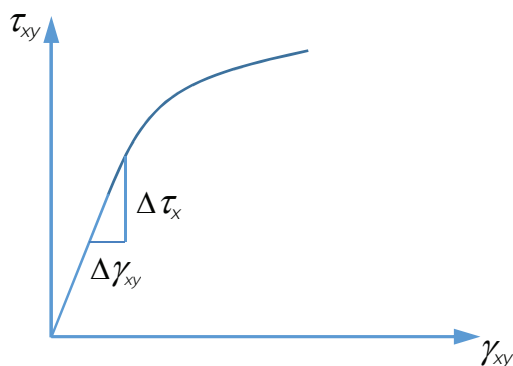
เมื่อกำหนดให้โมดูลัสอีลาสติก $E = 200 \text{ GPa}$ จะได้โมดูลัสของแรงเฉือน $77,200 \text{ MPa}$ ($G = 77,200 \text{ MPa} \approx 7.72 \times 10^5 \text{ ksc}$) อัตราส่วนพัวซอง $\nu \approx 0.30$



(ก) หน่วยแรงเฉือน



(ข) ความเครียดแรงเฉือน



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและความเครียดแรงเฉือน

รูปที่ 1.5 โมดูลัสของแรงเฉือน

3) กำลังดึงและหน่วยแรงครากของเหล็กโครงสร้าง

โดยทั่วไป เหล็กโครงสร้างเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าอัลลอย ผลิตจากการรีดร้อน (Hot rolled process) มีทั้งเหล็กกำลังปกติและกำลังสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและแมงกานีสในส่วนผสม ความหนาแน่นของเหล็กกล้า $\gamma_{st} = 7,850 \text{ kg/m}^3$ หรือความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 7.85 เหล็กโครงสร้างที่ผลิตใช้ในประเทศและส่งออกเป็นไปตามมาตรฐานสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา (American Society for Testing and Materials, ASTM) มี 3 ประเภท ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) ดังตารางที่ 1.1 เหล็กกล้าอัลลอยผสมต่ำกำลังสูง (High-strength low-alloy steel) ดังตารางที่ 1.2 และเหล็กกล้าอัลลอยผสมต่ำกำลังสูงคงทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance high-strength low-alloy steel) ดังตารางที่ 1.3

นอกจากเหล็กมาตรฐาน ASTM ยังมีการผลิตเหล็กมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standards, JIS) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, มอก. (Thai Industrial Standards, TIS) คุณสมบัติและกำลังรับแรงของเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน มอก. 1227-2558 (TIS 1227) [5] ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับโครงสร้างทั่วไป มอก. 107-2561 (TIS 107) [6] ดังตารางที่ 1.4 และมาตรฐาน JIS ดังตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติและกำลังรับแรงของเหล็กกล้าคาร์บอน [7-11]

มาตรฐาน ASTM	เกรด	หน่วยแรงคราก (ksc)	กำลังดึง (ksc)	คุณสมบัติ
A36	$t \leq 20 \text{ mm}$	2,450	4,000 – 5,500	เหล็กรูปพรรณ แผ่นเรียบ และแท่งเหล็ก ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป
	$t > 20 \text{ mm}$	2,200	4,000 – 5,500	
A53	Grade A	2,050	3,300	ท่อเหล็กทนแรงดัน (Steel pipes) ใช้ใน งานโครงสร้างทั่วไป
	Grade B	2,400	4,150	
A500	Grade B	2,900	4,000	เหล็กท่อกลม ขึ้นรูปเย็นเชื่อมและไม่มี ตะเข็บ ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป
	Grade C	3,150	4,250	
	Grade B	3,150	4,000	เหล็กกล่อง ขึ้นรูปเย็นเชื่อมและไม่มี ตะเข็บ ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป
	Grade C	3,500	4,250	
A501	Grade A	2,500	4,000	เหล็กท่อและกล่อง ขึ้นรูปร้อนเชื่อมและ ไม่มีตะเข็บ ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป
	Grade B	3,450	4,850	
A529	Grade 50	3,450	4,850 – 6,900	เหล็กรูปพรรณ แผ่นเรียบ และแท่งเหล็ก ใช้ในงานอาคาร และโครงสร้างทั่วไป
	Grade 55	3,800	4,850 – 6,900	

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติและกำลังรับแรงของเหล็กกล้าผสมต่ำกำลังสูง [12-15]

มาตรฐาน ASTM	เกรด	หน่วยแรงคราก (ksc)	กำลังดึง (ksc)	คุณสมบัติ
A572	Grade 42	2,900	4,150	เหล็กรูปพรรณ แผ่นเรียบ เสาเข็มพืด และแท่งเหล็ก ใช้ในงานสะพาน อาคาร
	Grade 50	3,450	4,500	
	Grade 55	3,800	4,850	
	Grade 60	4,150	5,200	
	Grade 65	4,500	5,500	
A618	Grade I & II	3,450	4,850	เหล็กท่อและกล่อง ขึ้นรูปร้อนเชื่อมและ ไม่มีตะเข็บ ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป
	Grade III	3,450	4,500	
A913	Grade 50	3,450	4,500	เหล็กรูปพรรณ ใช้ในงานสะพาน อาคาร และโครงสร้างทั่วไป
	Grade 60	4,150	5,200	
	Grade 65	4,500	5,500	
	Grade 70	4,850	6,200	
A992		3,450	4,500	เหล็กรูปพรรณ ใช้ในงานโครงอาคาร สะพาน และโครงสร้างทั่วไป

ตารางที่ 1.3 คุณสมบัติและกำลังรับแรงของเหล็กกล้าผสมต่ำกำลังสูงด้านการกัดกร่อน [16-18]

มาตรฐาน ASTM	เกรด	หน่วยแรงคราก (ksc)	กำลังดึง (ksc)	คุณสมบัติ
A242	Grade 42	4,350	2,900	เหล็กชุบพอร์น แผ่นเรียบ และแท่งเหล็ก ใช้ในงานโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการ กัดกร่อน
	Grade 46	4,600	3,150	
	Grade 50	4,800	3,450	
A588	$t \leq 100 \text{ mm}$	3,450	4,850	เหล็กชุบพอร์น แผ่นเรียบ และแท่งเหล็ก ใช้ในงานสะพาน อาคาร โครงสร้างทั่วไป ที่มีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อน
A847		3,450	4,850	เหล็กทอกลมและกล่อง ขึ้นรูปเย็นเชื่อม และไม่มีตะเข็บ ใช้ในงานสะพาน อาคาร และโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการกัด กร่อน

ตารางที่ 1.4 คุณสมบัติและกำลังรับแรงของเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน มอก.

มาตรฐาน	เกรด	หน่วยแรงครากต่ำสุด (ksc)		กำลังดึงต่ำสุด (ksc)	คุณสมบัติ
		$t \leq 16 \text{ mm}$	$t > 16 \text{ mm}$		
TIS 1227	SM400	2,450	2,350	4,000 – 5,100	เหล็กรีดร้อน ใช้ในงาน โครงสร้างทั่วไป เหมาะสำหรับการเชื่อม
	SM490	3,250	3,150	4,900 – 6,100	
	SM520	3,650	3,550	5,200 – 6,400	
	SM570	4,600	4,500	5,700 – 7,200	
	SS400	2,450	2,350	4,000 – 5,100	เหล็กรีดร้อน ใช้ในงาน โครงสร้างทั่วไป เหมาะสำหรับการตัดโค้ง
	SS490	2,850	2,750	4,900 – 6,100	
	SS540	4,000	3,900	5,400	

ตารางที่ 1.4 คุณสมบัติและกำลังรับแรงของเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน มอก. (ต่อ)

มาตรฐาน	เกรด	หน่วยแรงครากต่ำสุด (ksc)		กำลังดึงต่ำสุด (ksc)	คุณสมบัติ
		$t \leq 16 \text{ mm}$	$t > 16 \text{ mm}$		
TIS 107	STK290	-	-	2,900	เหล็กท่อกลมไร้ตะเข็บ และมีตะเข็บ ใช้งาน โครงสร้างทั่วไป
	STK400	2,350	2,350	4,000	
	STK490	3,150	3,150	4,900	
	STK500	3,550	3,550	5,000	
	STK540	3,900	3,900	5,400	
	STK290	-	-	2,900	เหล็กท่อบีเหลี่ยมจัตุรัส และไร้ตะเข็บและมี ตะเข็บ ใช้งาน โครงสร้างทั่วไป
	STK400	2,450	2,450	4,000	
	STK490	3,250	3,250	4,900	

1.2.5 รูปหน้าตัดมาตรฐานของเหล็กที่ใช้ในงานโครงสร้าง

วัตถุประสงค์หลักอีกประการในการออกแบบโครงสร้างเหล็ก คือ การเลือกหน้าตัดเหล็กให้ได้ขนาดที่ใกล้เคียงกับหน้าตัดออกแบบ สามารถต้านทานกำลังรับแรงที่ต้องการได้อย่างปลอดภัยและประหยัด (Required strength) โดยทั่วไปจะเลือกขนาดหน้าตัดเหล็กตามมาตรฐานการผลิต ถึงแม้ว่าขนาดที่เลือกอาจจะโตกว่าขนาดที่ต้องการมาก แต่ก็ยังเป็นประโยชน์ในเรื่องความรวดเร็วในการออกแบบและก่อสร้างมากกว่าที่จะเลือกใช้ขนาดที่สร้างขึ้นเอง (Build up section) รูปหน้าตัดมาตรฐานที่ใช้กันแพร่หลายในประเทศไทยเป็นรูปทรงตามมาตรฐาน ASTM JIS และ มอก. ขนาดหน้าตัดตามมาตรฐาน มอก. คล้ายคลึงกับมาตรฐาน JIS เหล็กโครงสร้างที่ใช้ในงานโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเหล็กรีดร้อน ขบวนการผลิตเริ่มต้นจากการหลอมเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอน แมงกานีส และธาตุอื่นๆ ให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ จากนั้นหล่อขึ้นรูปเบื้องต้นอาจจะมีรูปทรงแบบแท่งจัตุรัส แบบแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า และแบบแผ่น เป็นต้น ปลอ่ยให้แข็งตัวและเย็นตัวลงแต่แท่งเหล็กยังร้อนแดงอยู่ จากนั้นนำเข้าสู่ขบวนการรีดเพื่อให้ได้รูปทรงตามต้องการ ขณะรีดแท่งเหล็กจะมีความยาวเพิ่มขึ้น โดยปกติจะรีดให้แท่งเหล็กมีความยาวในช่วง 24 – 30 m หลังจากนั้นนำเข้าสู่ขบวนการตัดให้มีความยาว 6 m เพื่อนำขายในท้องตลาด

ตารางที่ 1.5 คุณสมบัติและกำลังรับแรงของเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน JIS [19-24]

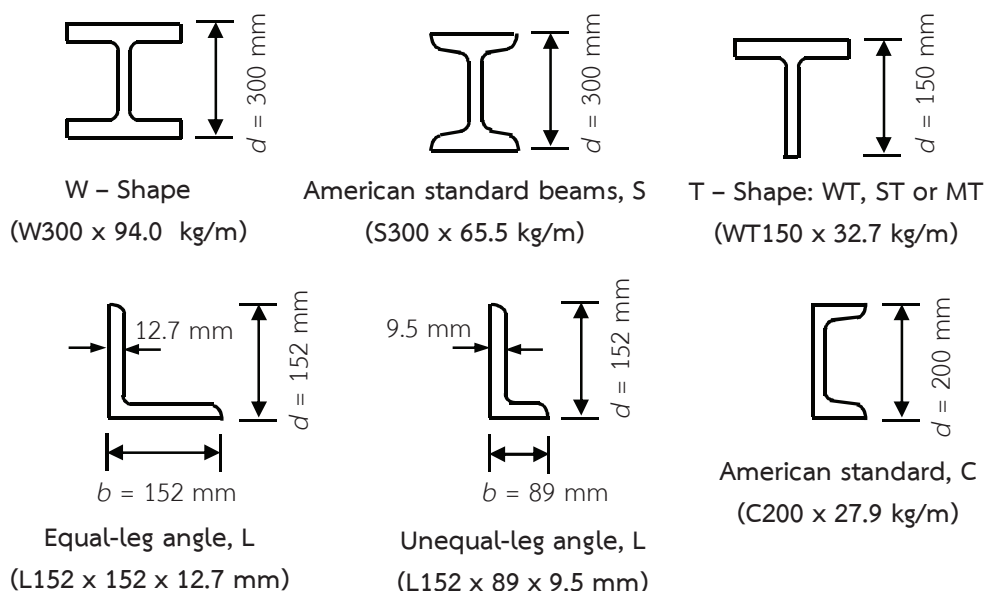
มาตรฐาน	เกรด	หน่วยแรงครากต่ำสุด (ksc)		กำลังดึงต่ำสุด (ksc)	คุณสมบัติ
		$t \leq 16$ mm	$t > 16$ mm		
JIS G3101	SS400	2,450	2,350	4,000 – 5,100	เหล็กรีดร้อน ใช้ในงาน
	SS490	2,850	2,750	4,900 – 6,100	โครงสร้างทั่วไป
	SS540	4,000	3,900	5,400	เหมาะสำหรับการดัดโค้ง
JIS G3106	SM400	2,450	2,350	4,000 – 5100	เหล็กรีดร้อน ใช้ในงาน
	SM490	3,250	3,150	4,900 – 6,100	โครงสร้างทั่วไป
	SM490 Y	3,650	3,550	4,900 – 6,100	เหมาะสำหรับการเชื่อม
JIS G3444	STK400	2,450		4,000	เหล็กท่อ ใช้ในงาน
	STK490	3,150		4,900	โครงสร้างทั่วไป
JIS G3466	STKR400	2,450		4,000	เหล็กกล่อง ใช้ในงาน
	STKR490	3,250		4,900	โครงสร้างทั่วไป
JIS G3114	SMA490	3,150 – 3,250		4,900 – 6,100	เหล็กรีดร้อน ทนต่อการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศ
JIS G3350	SSC400	2,450		4,000 – 5,100	เหล็กขึ้นรูปเย็น ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป

1) เหล็กรูปพรรณที่ใช้ในงานโครงสร้าง

มาตรฐาน ASTM A6/A6M [25] กำหนดรูปทรงของเหล็กรูปพรรณ โดยมีรายละเอียดรูปหน้าตัด ดังนี้

(1) **หน้าตัดปีกกว้าง (Wide-Flange, W-shape)** ประกอบด้วยแผ่นปีก (Flange) 2 แผ่น ขอบนอกและขอบในของแผ่นปีกขนานกัน และแผ่นเอว (Web) 1 แผ่น รีดให้แผ่นเอวตั้งฉากและอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นปีก มีแกนสมมาตร 2 แกน กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร W ตามด้วยความลึกที่ระบุ x น้ำหนักต่อเมตร หน่วยเป็น kg/m เช่น W300 x 65.4 kg/m หมายถึงเหล็กหน้าตัด W มีความลึกที่ระบุ (d) 300 mm และน้ำหนัก 65.4 kg/m ดังรูปที่ 1.6 ความลึกที่ระบุเป็นเพียงความลึกประมาณที่เป็นตัวเลขกลมๆ ในหน่วยมิลลิเมตร ความลึกที่แท้จริงอาจจะมากกว่า

หรือน้อยกว่าเล็กน้อย หน้าตัด W อาจรวมกลุ่มเป็นชุดตามความลึกที่ระบุ เนื่องจากความกว้างระหว่างขอบด้านในของแผ่นปีกถึงขอบด้านในของแผ่นปีกอีกแผ่นมีขนาดเท่ากันต่างกันเฉพาะความหนาของปีก จึงทำให้ความลึกที่แท้จริงต่างกัน



รูปที่ 1.6 รูปหน้าตัดเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A6/A6M [25]

(2) **หน้าตัดเอช HP (H-Piles)** เข็มเหล็กเอชรับแรงแบกทาน (Bearing piles) มีรูปทรงคล้ายคลึงกับหน้าตัด W แต่มีความลึกของแผ่นเอว (d) เท่ากับความกว้างของแผ่นปีก (b_f) และความหนาของแผ่นปีกและแผ่นเอวเท่ากัน ($t_f = t_w$) กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร HP ตามด้วยความลึกระบุ x น้ำหนักต่อเมตร หน่วยเป็น kg/m เช่น HP250 x 85.0 kg/m หมายถึง เหล็กหน้าตัด HP หรือเข็มเหล็กเอชรับแรงแบกทาน มีความลึกระบุ (d) 250 mm และน้ำหนัก 85.0 kg/m

(3) **หน้าตัดคาน S มาตรฐานอเมริกา (American standard beam, S)** หน้าตัดคานเหล็กคานมาตรฐานอเมริกา หรือ S-shape เมื่อก่อนเรียกหน้าตัด I (I-Beam) มีรูปทรงคล้ายคลึงกับหน้าตัด W มีแผ่นปีกคู่ที่ขนานกัน แผ่นเอวหนึ่งแผ่น และมีแกนสมมาตรสองแกนเช่นกัน แตกต่างตรงที่หน้าตัด W มีแผ่นปีกยาวกว่าหน้าตัด S และขอบด้านนอกและขอบด้านในของแผ่นปีกของหน้าตัด W ขนานกัน ขณะที่ขอบในแผ่นปีกของหน้าตัด S ลาดเอียงจากแผ่นเอว

ออกสู่ผิวนอกมีความลาดชัน 1:6 ดังรูปที่ 1.6 กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร S ตามด้วยความลึกระบุ $\times$ น้ำหนักต่อเมตรเป็น kg/m เช่น S300 $\times$ 65.5 kg/m หมายถึง เหล็กหน้าตัด S มีความลึกระบุ 300 mm และน้ำหนัก 65.5 kg/m อย่างไรก็ตาม การบอกรูปทรงขนาดยังนิยมใช้ I300 $\times$ 65.5 kg/m

(4) **หน้าตัด M (M-shapes)** เป็นหน้าตัดที่ไม่สามารถจำแนกเป็น W S และ HP ประกอบด้วยแผ่นปีก (Flange) 2 แผ่น ขอบนอกและขอบในของแผ่นปีกขนานกัน และแผ่นเอว (Web) 1 แผ่น กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร M ตามด้วยความลึกระบุ $\times$ น้ำหนักต่อเมตร หน่วยเป็น kg/m เช่น M200 $\times$ 9.7 kg/m หมายถึง เหล็กหน้าตัด M มีความลึกระบุ (d) 200 mm และน้ำหนัก 9.7 kg/m

(5) **หน้าตัดมาตรฐานอเมริกา (American Standard Channel, C-shapes)** มีแกนสมมาตร 1 แกน แผ่นปีกสองแผ่นขนานกัน และแผ่นเอวหนึ่งแผ่นรีดตั้งฉากที่ปลายแผ่นปีก ขอบในของแผ่นปีกลาดเอียงจากแผ่นเอวลู่ออกด้านนอก มีความชัน 1:6 กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร C ตามด้วยความลึกระบุ $\times$ น้ำหนักต่อเมตร หน่วยเป็น kg/m เช่น C200 $\times$ 27.9 kg/m หมายถึง หน้าตัดเหล็กทรง C มีความลึกระบุ 200 mm และน้ำหนัก 27.9 kg/m

(6) **หน้าตัดราง MC (Miscellaneous Channels, MC-shapes)** เป็นหน้าตัดเหล็กทรงที่ไม่สามารถจำแนกเป็นเหล็กทรง C ได้ กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร MC ตามด้วยความลึกระบุ $\times$ น้ำหนักต่อเมตร หน่วยเป็น kg/m เช่น MC250 $\times$ 50.0 kg/m หมายถึง หน้าตัดเหล็กทรง MC มีความลึกระบุ 250 mm และน้ำหนัก 50.0 kg/m

(7) **เหล็กรูปฉาก (Angle Shape, L)** หน้าตัด L มี 2 ประเภท ได้แก่ เหล็กรูปฉาก L ขาวยาวเท่ากัน (Equal-leg angle) และเหล็กรูปฉาก L ขาวยาวไม่เท่ากัน (Unequal-leg angle) มีความหนาของขาทั้งสองเท่ากัน กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร L ตามด้วยความยาวขายาว $\times$ ความยาวขาสั้น $\times$ ความหนาของขา หน่วยเป็นมิลลิเมตร เช่น L152 $\times$ 152 $\times$ 12.7 mm (กรณีหน้าตัด L มีขายาวเท่ากัน) หมายถึง หน้าตัด L ขาวยาวเท่ากัน 152 mm ขามีความหนา 12.7 mm และ L152 $\times$ 89 $\times$ 9.5 mm (กรณีหน้าตัด L มีขายาวไม่เท่ากัน) หมายถึง เหล็กหน้าตัด L มีขาวยาว 152 mm ขาสั้นยาว 89 mm ขามีความหนา 9.5 mm

(8) **หน้าตัด T (Structural Tee, T-shapes)** เป็นหน้าตัดที่ได้จากการตัดหน้าตัด W S และ M ออกเป็น 2 ส่วนเท่ากัน เรียกชื่อตามหน้าตัดที่ตัดเป็น WT ST และ MT ตามลำดับ กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร WT หรือ ST หรือ MT ตามลำดับ ตามด้วยความลึกระบุ $\times$ น้ำหนักต่อเมตร หน่วยเป็น kg/m เช่น WT150 $\times$ 32.7 kg/m หมายถึงเหล็กหน้าตัด T มีความลึก 150 mm และน้ำหนัก 32.7 kg/m ตัดจากเหล็กหน้าตัด W300 $\times$ 65.4 kg/m เป็นต้น

2) แท่งเหล็กที่ใช้ในงานโครงสร้าง (Bars for Structural Steel)

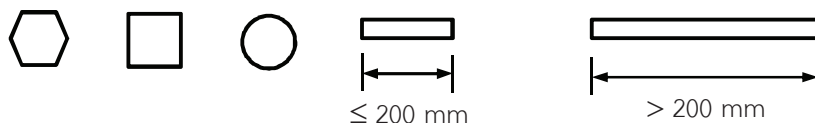
มาตรฐาน ASTM A36/A36M [25] กำหนดรายละเอียดรูปทรงของแท่งเหล็กเป็นหน้าตัดกลม (Round) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) ที่มีความกว้างไม่เกิน 200 mm ถ้ามีความกว้างเกิน 200 mm จะพิจารณาเป็นแผ่นเหล็ก (Plate) และหน้าตัดหกเหลี่ยม (Hexagonal) ดังรูปที่ 1.7 กำหนดรายละเอียดหน้าตัด ดังนี้

(1) **แท่งกลม** กำหนดรายละเอียดใช้สัญลักษณ์ $\bigcirc$ ตามด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เช่น O20 หมายถึง เหล็กหน้าตัดวงกลมตัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ 20 mm

(2) **แท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส** กำหนดรายละเอียดใช้สัญลักษณ์ $\square$ ตามด้วยความกว้างระบุ เช่น $\square$ 25 หมายถึง เหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความกว้างระบุ 25 mm

(3) **แท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า** หรือแท่งแผ่นเรียบ (Flat bars) ใช้อักษร PL ตามด้วยกว้างระบุ $\times$ ความหนาระบุ เช่น PL150 $\times$ 12 mm หมายถึง แท่งแผ่นเรียบสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้าง 150 mm หนา 12 mm และ PL250 $\times$ 10 mm หมายถึง แผ่นเหล็กเรียบ มีความกว้าง 250 mm หนา 10 mm เป็นต้น

(4) **แท่งหกเหลี่ยม** กำหนดรายละเอียดใช้อักษร Hex ตามด้วยความกว้างระบุ วัดจากขอบเรียบถึงขอบเรียบที่อยู่ฝั่งตรงกันข้าม เช่น Hex25 หมายถึง แท่งหกเหลี่ยม มีความกว้างระบุของขอบเรียบถึงขอบเรียบที่อยู่ฝั่งตรงกันข้าม 25 mm



(ก) แท่งเหล็ก (Steel bars)

(ข) แผ่นเรียบ (Plate)

รูปที่ 1.7 แท่งเหล็กที่รื้อตามมาตรฐาน ASTM A6/A6M

3) หน้าตัดเหล็กกลวงที่ใช้ในงานโครงสร้าง (Hollow Structural Sections)

หน้าตัดเหล็กกลวง ได้แก่ ท่อกลม (O HSS) สี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง (□ HSS) และท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้ากลวง (▤ HSS) ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A500/A500M มีความกว้างจากขอบนอกถึงขอบนอกไม่เกิน 1,600 mm ดังรูปที่ 1.8 กำหนดรายละเอียดหน้าตัด ดังนี้

การกำหนดรายละเอียดท่อกลม ใช้อักษร O HSS ตามด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก x ความหนาผนังท่อ เช่น O HSS250 x 12 mm หมายถึง ท่อเหล็กกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 250 mm ความหนาผนัง 12 mm

ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและผืนผ้ากลวง ใช้อักษร □ HSS ตามด้วยขนาดความลึกภายนอกถึงขอบนอก x ความกว้างภายนอกถึงขอบนอก x ความหนาผนังท่อ เช่น □ HSS250 x 250 x 13 mm หมายถึง ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความลึกภายนอก 250 mm ความกว้างภายนอก 250 mm ความหนาผนัง 13 mm และ □ HSS200 x 100 x 9 mm หมายถึง ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความลึกภายนอก 200 mm ความกว้างภายนอก 100 mm ความหนาผนัง 9 mm

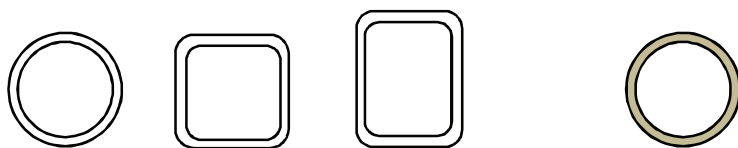
4) ท่อเหล็กทนแรงดันที่ใช้ในงานโครงสร้าง

ท่อเหล็กทนแรงดัน (Steel pipes) มีรูปทรงเป็นท่อกลมมีความหนาผนังสม่ำเสมอ ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A53/A53M มี 3 ประเภท ได้แก่ มาตรฐาน (Standard) แข็งแรงพิเศษ (Extra-strong) และแข็งแรงพิเศษสองเท่า (Double-extra-strong) ดังรูปที่ 1.8(ก) ท่อเหล็กทั้งสามประเภท มีการกำหนดขนาดท่อมาตรฐานระบุ NPS (Nominal pipe size standard) จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุเท่ากัน แตกต่างกันเฉพาะความหนาของผนัง โดยที่เกรดแข็งแรงพิเศษสองเท่ามีความหนาที่สุด รองลงมาเป็นเกรดแข็งแรงพิเศษ และเกรดมาตรฐานมีความหนาน้อยที่สุด การกำหนดรายละเอียดหน้าตัด NPS ใช้อักษร Pipe ตามด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ และตามด้วยเกรดความแข็งแรง เช่น

Pipe 127 Std. หมายถึง ท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ 127 mm เกรดมาตรฐาน ความหนา 6.553 mm

Pipe 127 x-Strong หมายถึง ท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ 127 mm เกรดแข็งแรงพิเศษ ความหนา 9.525 mm

Pipe 127 xx-Strong หมายถึง ท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ 127 mm เกรดแข็งแรงพิเศษสองเท่า ความหนา 12.700 mm เป็นต้น ในกรณีที่ท่อเหล็กมีขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน หรือรายละเอียดการผลิตไม่ได้ระบุเกรดมาตรฐาน การกำหนดรายละเอียดหน้าตัด ให้ใช้ตัวอักษร Pipe ตามด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกระบุ x ความหนาผนัง ในการระบุตัวเลขให้ใช้ความละเอียดตัวเลขทศนิยม 3 ตำแหน่ง เช่น Pipe 144.300 x 6.550 mm หมายถึง ท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 144.300 mm ความหนา 6.550 mm



(ก) ท่อเหล็ก HSS ASTM A500

(ข) ท่อเหล็กทนแรงดัน ASTM A53

รูปที่ 1.8 ท่อเหล็ก HSS และท่อเหล็กทนแรงดัน (Steel pipes)

1.3 เหล็กรูปพรรณตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

1.3.1 เหล็กรูปพรรณรีดร้อนตามมาตรฐาน มอก. 1227

เหล็กรูปพรรณรีดร้อนตามมาตรฐาน มอก. 1227 – 2558 มี 7 ชั้นคุณภาพ ได้แก่ SM400 SM490 SM520 SM570 SS400 SS490 และ SS540 ดังตารางที่ 1.4 แบ่งรูปหน้าตัดเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 1.9 ได้แก่

1) เหล็กฉาก (Angle steel)

เหล็กฉากมี 2 แบบ ได้แก่ เหล็กฉากขาเท่ากัน และขาไม่เท่ากัน มีความหนาของขาทั้งสองเท่ากัน กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร L ตามด้วยความยาวขายาว x ความยาวขาสั้น x ความหนาของขา หน่วยเป็นมิลลิเมตร เช่น L150x150x12 mm (กรณีเหล็กฉาก L ขายาวเท่ากัน) หมายถึง เหล็กฉากขายาวเท่ากัน 150 mm ขามีความหนา 12 mm และ L150 x 90 x 9 mm (กรณีเหล็กฉากมีขายาวไม่เท่ากัน) หมายถึง เหล็กฉากมีขายาวยาว 150 mm ขาสั้นยาว 90 mm ขามีความหนา 9 mm ขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเหล็กฉาก ดังภาคผนวก ฉ และภาคผนวก ช

2) เหล็กทรงรางน้ำ (Channel steel)

เหล็กทรงรางน้ำตามมาตรฐาน มอก. 1227-2558 จะรวมเหล็กหน้าตัดราง C และราง MC ตามมาตรฐาน ASTM A6/A6M เป็นประเภทเดียว นิยมเรียกว่าเหล็กทรง C กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร C ตามด้วยความลึกกระบอก (mm) x ความกว้างกระบอก (mm) x น้ำหนักต่อเมตร (kg/m) เช่น C200x90x30.3 kg/m หมายถึง หน้าตัดเหล็กทรง C มีความลึกกระบอก 200 mm ความกว้างกระบอก 90 mm และน้ำหนัก 30.3 kg/m ขนาดหน้าตัด คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเหล็กทรงรางน้ำ ดังภาคผนวก ข

3) เหล็กทรงตัวเอช (H-section steel)

เหล็กทรงตัวเอชตามมาตรฐาน มอก. 1227-2558 ได้รวมเหล็กหน้าตัด W HP และ M ตามมาตรฐาน ASTM A6/A6M เป็นประเภทเดียว นิยมเรียกกันว่า เหล็กปีกกว้าง (Wide-flange steel, W) กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร H ตามด้วยความลึกกระบอก (mm) x ความกว้างกระบอก (mm) x น้ำหนักต่อเมตร (kg/m) เช่น H300x300x106.0 kg/m หรือ W300x300x106.0 kg/m หมายถึง หน้าตัดเหล็กทรงตัวเอช มีความลึกกระบอก 300 mm ความกว้างกระบอก 300 mm และน้ำหนัก 106.0 kg/m ขนาดหน้าตัด คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเหล็กทรงตัวเอช หรือเหล็กหน้าตัด W ดังภาคผนวก ง

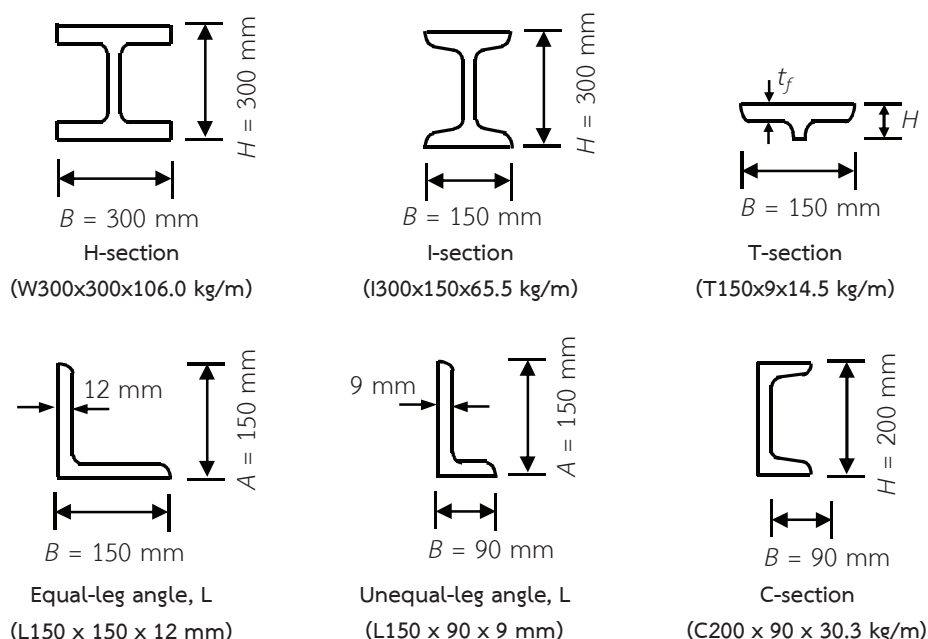
4) เหล็กทรงตัวไอ (I-section steel)

เหล็กทรงตัวไอ กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร I ตามด้วยความลึกกระบอก (mm) x ความกว้างกระบอก (mm) x น้ำหนักต่อเมตร (kg/m) เช่น I300x150x65.5 kg/m หมายถึง เหล็กทรงตัวไอ มีความลึกกระบอก 300 mm ความกว้างกระบอก 150 mm และน้ำหนัก 65.5 kg/m ขนาดหน้าตัด คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเหล็กทรงตัวไอ ดังภาคผนวก ค

5) เหล็กทรงตัวที (T-section steel)

เหล็กทรงตัวทีตามมาตรฐาน มอก. 1227-2558 กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร T ตามด้วยความกว้างปีกกระบอก (mm) x ความหนาปีกกระบอก (mm) x น้ำหนักต่อเมตร (kg/m) เช่น T150x9x14.5 kg/m ไม่นิยมใช้ในงานโครงสร้างเนื่องจากมีตัวก้าน (Stem) สั้น นิยมใช้เหล็กทรงตัวทีตามมาตรฐาน ASTM A6/A6M หรือตามมาตรฐาน JIS G3192 มากกว่าเนื่องจากมีตัวก้านที่ยาวกว่า กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร WT ตามด้วยความลึกกระบอก (mm) x ความกว้างกระบอก (mm)

x น้ำหนักต่อเมตร (kg/m) เช่น WT150x300x47.0 kg/m หมายถึง เหล็กที มีความลึกระบุเป็นครึ่งหนึ่งของเหล็ก W300x300x94.0 kg/m มีความลึกระบุ 150 mm ความกว้างระบุ 300 mm และน้ำหนัก 47.0 kg/m ขนาดหน้าตัด คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเหล็ก WT ดังภาคผนวก จ อื่นๆขนาดหน้าตัดของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณตามมาตรฐาน มอก.1227-2558 มีขนาดเดียวกับมาตรฐาน JIS G3192



รูปที่ 1.9 รูปหน้าตัดเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน มอก. 1227-2558

1.3.2 เหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นตามมาตรฐาน มอก. 1228

เหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นตามมาตรฐาน มอก. 1228 – 2549 [26] ขึ้นรูปโดยใช้แผ่นเรียบ มีความหนาสม่ำเสมอตัดหรือพับเป็นรูปทรงมาตรฐาน 6 แบบ ดังรูปที่ 1.10 ได้แก่

1) เหล็กฉากพับ (Light angle steel)

เหล็กฉากพับมี 2 แบบ ได้แก่ เหล็กฉากขาเท่ากัน และขาไม่เท่ากัน มีความหนาของขาทั้งสองเท่ากัน กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร L ตามด้วยความยาวขายาว (A) x ความยาว

ขาสั้น (B) $\times$ ความหนาของขา (t) หน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.10 เช่น L50 $\times$ 50 $\times$ 3.2 mm (กรณีหน้าตัด L มีขายาวเท่ากัน) หมายถึง เหล็กฉากพับขายาวเท่ากัน 50 mm ขามีความหนา 3.2 mm และ L75 $\times$ 30 $\times$ 3.2 mm (กรณีเหล็กฉากพับมีขายาวไม่เท่ากัน) หมายถึง เหล็กฉากพับมีขายาวยาว 75 mm ขาสั้นยาว 30 mm ขามีความหนา 3.2 mm

2) เหล็กรางพับ (Light channel steel)

เหล็กรางพับ กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร C ตามด้วยความลึกกระบอก (H) $\times$ ความกว้างแผ่นปีกยาวระบุน (A) $\times$ ความกว้างแผ่นปีกสั้นระบุน (B) $\times$ ความหนา (t) หน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.10 เช่น C60 $\times$ 30 $\times$ 30 $\times$ 2.3 mm (กรณีความกว้างแผ่นปีกยาวเท่ากัน) หมายถึง เหล็กรางพับมีความลึกกระบอก 60 mm ความกว้างแผ่นปีกยาวเท่ากัน 30 mm และความหนา 1.3 mm และ C75 $\times$ 40 $\times$ 15 $\times$ 3.2 mm (กรณีความกว้างแผ่นปีกยาวไม่เท่ากัน) หมายถึง เหล็กรางพับมีความลึก 75 mm ความกว้างแผ่นปีกยาว 40 mm ความกว้างแผ่นปีกสั้น 15 mm และความหนา 3.2 mm

3) เหล็กรูปตัวซีพับ (Lip channel steel)

เหล็กรูปตัวซี มีความกว้างแผ่นปีกยาวเท่ากัน (A) และความยาวขอบเท่ากัน (C) กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร C ตามด้วยความลึกกระบอก (H) $\times$ ความกว้างแผ่นปีกระบุน (A) $\times$ ความยาวขอบ (C) $\times$ ความหนา (t) หน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.10 เช่น C90 $\times$ 45 $\times$ 20 $\times$ 2.3 mm หมายถึง เหล็กรูปตัวซี มีความลึกกระบอก 90 mm ความกว้างแผ่นปีกระบุน 45 mm ความยาวขอบ 20 mm และความหนา 2.3 mm ขนาดหน้าตัด คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของเหล็กรูปตัวซี

4) เหล็กรูปตัวแซด (Light Z steel)

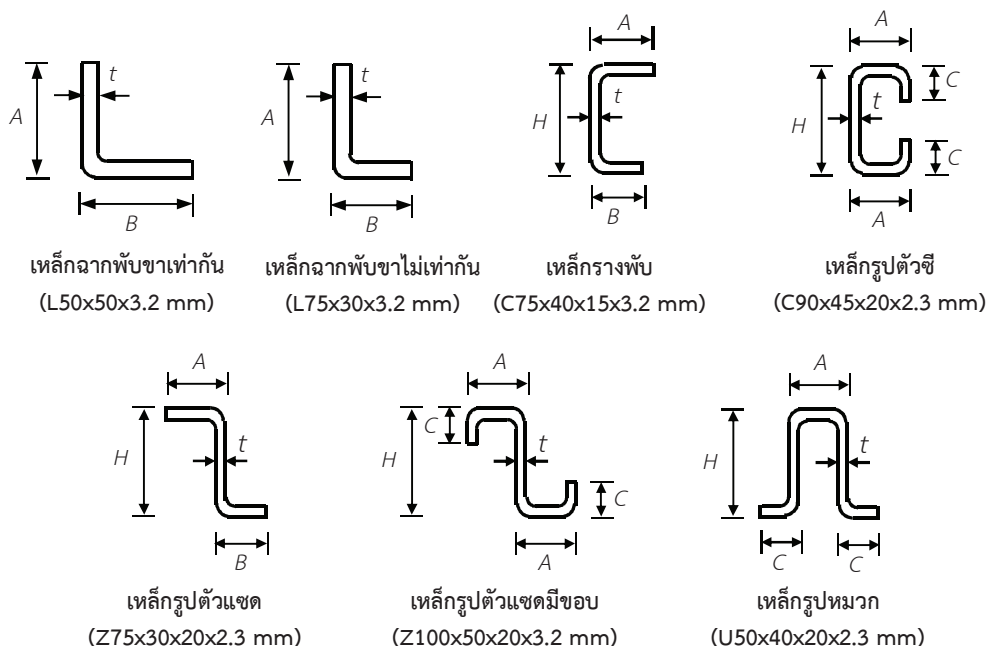
เหล็กรูปตัวแซด กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร Z ตามด้วยความลึกกระบอก (H) $\times$ ความกว้างแผ่นปีกยาวระบุน (A) $\times$ ความกว้างแผ่นปีกสั้นระบุน (B) $\times$ ความหนา (t) หน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.10 เช่น Z60 $\times$ 30 $\times$ 30 $\times$ 2.3 mm (กรณีความกว้างแผ่นปีกยาวเท่ากัน) หมายถึง เหล็กรูปตัวแซด มีความลึกกระบอก 60 mm ความกว้างแผ่นปีกยาวเท่ากัน 30 mm และความหนา 2.3 mm และ Z75 $\times$ 30 $\times$ 20 $\times$ 2.3 mm (กรณีความกว้างแผ่นปีกยาวไม่เท่ากัน) หมายถึง เหล็กรูปตัวแซด มีความลึกกระบอก 75 mm ความกว้างแผ่นปีกยาว 30 mm ความกว้างแผ่นปีกสั้นระบุน 20 mm และความหนา 2.3 mm

5) เหล็กรูปตัวแซดมีขอบ (Lip Z steel)

เหล็กรูปตัวแซดมีขอบ มีความกว้างแผ่นปีกกระบอก (H) ยาวเท่ากัน และความยาวขอบกระบอก (C) ยาวเท่ากัน กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร Z ตามด้วยความลึกกระบอก (H) $\times$ ความกว้างแผ่นปีกกระบอก (A) $\times$ ความยาวขอบกระบอก (C) $\times$ ความหนากระบอก (t) หน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.10 เช่น Z100x50x20x3.2 mm หมายถึง เหล็กรูปตัวแซดมีขอบ มีความลึกกระบอก 100 mm ความกว้างแผ่นปีกกระบอก 50 mm ความกว้างขอบกระบอก 20 mm และความหนา 3.2 mm

6) เหล็กรูปหมวก (Hat steel)

เหล็กรูปหมวก มีความยาวขอบกระบอก (C) ยาวเท่ากัน กำหนดรายละเอียดเขียนด้วยอักษร U ตามด้วยความลึกกระบอก (H) $\times$ ความกว้างแผ่นปีกกระบอก (A) $\times$ ความยาวขอบกระบอก (C) $\times$ ความหนากระบอก (t) หน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.10 เช่น U50x40x20x2.3 mm หมายถึง เหล็กรูปหมวก มีความลึกกระบอก 50 mm ความกว้างแผ่นปีกกระบอก 40 mm ความกว้างขอบกระบอก 20 mm และความหนา 2.3 mm



รูปที่ 1.10 รูปหน้าตัดเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็นตามมาตรฐาน มอก. 1228-2549

1.4 เอกสารอ้างอิง

- [1] Wikipedia, Sydney harbour bridge, Last edited on 30 November 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Sydney_Harbour_Bridge. [Accessed 3 December 2019].
- [2] Dek-D, สร้างบ้าน-ตึกให้สวย ด้วย "เหล็ก", 21 สิงหาคม 2557. [ออนไลน์]. <https://www.dek-d.com/education/35261>. [สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2561].
- [3] Wikipedia, Burj khalifa, Last edited on 6 November 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa. [Accessed 3 December 2019].
- [4] Total material, Classification of carbon and low-alloy steels, November 2001, [Online]. Available: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=62>. [Accessed 11 November 2015].
- [5] มอก. 1227 – 2558, เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน (แก้ไขครั้งที่ 2), กทม.: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558.
- [6] มอก. 107 – 2562, ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป, กทม.: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562.
- [7] ASTM A36/36M – 19, Standard specification for carbon structural steel, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2019.
- [8] ASTM A53/A53M – 18, Standard specification for pipe, steel, black and hot-dipped, zinc-coated, welded and seamless, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2018.
- [9] ASTM A500/A500M – 18, Standard specification for cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2018.

- [10] ASTM A501/A501M – 14 Standard specification for Hot-formed welded and seamless carbon steel structural tubing, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2014.
- [11] ASTM A529/A529M – 19 Standard specification for hot-strength carbon-manganese steel and structural quality, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2019.
- [12] ASTM A572/A572M – 18 Standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2018.
- [13] ASTM A618/A618M – 04(2015) Standard specification for hot-formed welded and seamless high-strength low-alloy structural tubing, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2015.
- [14] ASTM A913/A913M – 19 Standard specification for high-strength low-alloy steel shapes of structural quality, produced by quenching and self-tempering process (QRT), West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2019.
- [15] ASTM A992/A992M – 11(2015) Standard specification for structural steel shapes, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2015.
- [16] ASTM A242/A242M – 13(2018) Standard specification for high-strength low-alloy structural steel, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2018.
- [17] ASTM A588/A588M – 19 Standard specification for high-strength low-alloy structural steel, up to 50 ksi [345 MPa] minimum yield point, with atmospheric corrosion resistance, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2019.

- [18] ASTM A847/A847M – 14 Standard specification for cold-formed welded and seamless high-strength, low-alloy structural tubing with improved atmospheric corrosion resistance, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2014.
- [19] JIS G3101 – 2010, Rolled steels for general structure, Minato-ku, Tokyo: Japanese standard association, 2010.
- [20] JIS G3106 – 2004, Rolled steels for welded structure, Minato-ku, Tokyo: Japanese standard association, 2004.
- [21] JIS G3444 – 2010, Carbon steel tubes for general, Minato-ku, Tokyo: Japanese standard association, 2010.
- [22] JIS G3466 – 2015, Carbon steel square and rectangular tubes for general structure, Minato-ku, Tokyo: Japanese standard association, 2015.
- [23] JIS G3114 – 2016, Hot-rolled atmospheric corrosion resisting steels for welded structure, Minato-ku, Tokyo: Japanese standard association, 2016.
- [24] JIS G3350 – 2017, Light gauge steel sections for general structure, Minato-ku, Tokyo: Japanese standard association, 2017.
- [25] ASTM A6/6M – 09, Standard specification for general requirements for rolled structural steel bars, plates, shapes, and sheet piling, West Conshohocken, PA: American society for testing and materials, 2009.
- [26] มอก. 1228 – 2549, เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น, กทม.: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2549.

บทที่ 2

วิธีการออกแบบและน้ำหนักบรรทุก

2.1 บทนำ

การออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อให้ได้อาคารที่มีความมั่นคง แข็งแรง สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์อย่างปลอดภัย จำเป็นต้องมีเกณฑ์ข้อบังคับอาคาร (Building code) และเกณฑ์ข้อกำหนดของการออกแบบ (Design specifications) ไว้คอยควบคุม และเป็นแนวทางให้วิศวกรออกแบบทำงานง่ายขึ้น เกณฑ์ข้อบังคับที่ใช้กันเป็นสากล เช่น เกณฑ์ข้อบังคับอาครนานาชาติ (International building code, IBC) [1] ซึ่งจะกำหนดเกณฑ์การรับน้ำหนักบรรทุก และเกณฑ์ความปลอดภัยของอาคารประเภทต่าง ๆ สำหรับข้อกำหนดในการออกแบบจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างนั้น ๆ เช่น การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI 318 [2] และการออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน AISC 360 [3] เป็นต้น การออกแบบโครงสร้างอาคารในประเทศไทยถูกควบคุมโดยกฎหมายควบคุมอาคารตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 [4] และมีข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารเหล็กรูปพรรณเป็น 2 มาตรฐาน ได้แก่ มาตรฐานสำหรับอาคารเหล็กรูปพรรณ [5] เป็นการออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งานที่ยอมให้ (Allowable stress design, ASD) ซึ่งได้เรียบเรียงปรับปรุงมาจากมาตรฐานสำหรับอาคารโครงสร้างเหล็ก ปี ค.ศ. 1989 [6] ปัจจุบัน AISC 360 ได้ปรับปรุงเปลี่ยนแปลงวิธีการออกแบบเป็นวิธีกำลังใช้งานที่ยอมให้ (Allowable strength design, ASD) และมาตรฐานการออกแบบอาคารโครงสร้างเหล็กโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and resistance factor design, LRFD) [7] ซึ่งได้ปรับปรุงเรียบเรียงมาจากมาตรฐาน AISC 360 – 05 [8] สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเหล็กในตำราเล่มนี้จะใช้เกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings เป็นเกณฑ์กำหนดสำหรับการ

ออกแบบโดยวิธีกำลังใช้งานที่ยอมให้ (Allowable strength design, ASD) และวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and resistance factor design, LRFD) [3]

2.2 แนวคิดการออกแบบโครงสร้างเหล็ก

ปรัชญาในการออกแบบโครงสร้าง ต้องให้ได้โครงสร้างที่มีความมั่นคง แข็งแรง ปลอดภัย และประหยัด มีรายละเอียด ดังนี้

(1) **ความมั่นคง** โครงสร้างต้องมีเสถียรภาพด้านรูปทรง เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงอย่างง่ายตายจนถึงขั้นวิบัติ

(2) **ความแข็งแรง** หน่วยแรงภายในองค์อาคารของโครงสร้างที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำ ต้องไม่เกินกำลังที่รับได้ขององค์อาคาร ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังของวัสดุและขนาดหน้าตัดขององค์อาคาร ดังสมการ (2.1)

$$\begin{array}{ccc} \text{กำลังที่ต้องการ} & \leq & \text{กำลังที่รับได้} \\ \text{(Required strength)} & & \text{(Available strength)} \end{array} \quad \text{..... (2.1)}$$

(3) **ความปลอดภัย** เพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างที่ใช้งานมีความปลอดภัยสามารถรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Service loads) ได้อย่างปลอดภัย อาศัยหลักการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Overloads) และลดกำลังที่รับได้ขององค์อาคารลง เพื่อให้ได้ขนาดขององค์อาคารที่ใหญ่ขึ้นเพียงพอต่อความปลอดภัย อายุการใช้งานที่ต้องการ และการเสื่อมสภาพของวัสดุ โดยคูณตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก (Load factors) เข้ากับน้ำหนักบรรทุกใช้งานตามความเชื่อมั่นของน้ำหนักบรรทุกแต่ละประเภท และคูณตัวคูณความปลอดภัย (Safety factor) เข้ากับกำลังระบุ (Nominal strength) ขององค์อาคาร

(4) **ความประหยัด** ในการเลือกหน้าตัดที่ได้จากการออกแบบต้องเป็นหน้าตัดที่เล็กที่สุดที่สามารถต้านทานกำลังที่ต้องการได้อย่างปลอดภัย

มาตรฐานข้อกำหนดสำหรับอาคารโครงสร้างเหล็ก ANSI/AISC 360-16 Specifications for structural steel buildings (American National Standards Institute/American Institute of Steel Construction 360-16 Specifications for structural steel buildings) [3] ได้กำหนดวิธีการออกแบบโครงสร้างเหล็กไว้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load

and resistance factor design, LRFD) และวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable strength design, ASD) ซึ่งทั้ง 2 วิธี มีหลักการพื้นฐานอยู่บนกรอบการออกแบบเดียวกัน ดังนี้

2.2.1 สภาวะขีดจำกัด

สภาวะขีดจำกัด (Limit state) หมายถึง สภาวะที่โครงสร้างหรือส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้าง อยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยพิจารณาจากการที่โครงสร้างไม่ปลอดภัย เรียกว่า สภาวะขีดจำกัดด้านกำลัง (Strength limit state) และจากการที่ไม่สามารถใช้งานได้ตาม วัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ เรียกว่า สภาวะขีดจำกัดด้านการใช้งาน (Serviceability limit state) [9]

(1) **สภาวะขีดจำกัดด้านกำลัง** เป็นสภาวะด้านความปลอดภัย (Safety state) หรือสภาวะการวิบัติ (Failure state) เนื่องจากแรงภายนอกกระทำ เช่น ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (Load-carrying capacity) การโก่งเดาะ (buckling) การล้า (Fatigue) รอยแตก (Fracture) การพลิกคว่ำ (Overturning) และการเลื่อนไถล (Sliding) เป็นต้น

(2) **สภาวะขีดจำกัดด้านการใช้งาน** เป็นพฤติกรรมของโครงสร้างหรือส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างภายใต้เงื่อนไขการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานปกติที่ส่งผลต่อความเสียหายจากการเสียรูป เช่น การโก่ง (Deflection) การสั่นไหว (Vibration) การเสียรูปอย่างถาวร (Permanent deformations) และรอยร้าว (Cracking) เป็นต้น

หลักเกณฑ์ของการออกแบบโครงสร้างหรือส่วนของโครงสร้างต้องคำนึงถึงความแข็งแรง และปลอดภัย กำลังที่รับได้ของโครงสร้างต้องมีค่ามากกว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหรือ ส่วนของโครงสร้าง ถ้าออกแบบให้กำลังที่รับได้มากกว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่ามาก ตัวคูณความปลอดภัย (Safety factors) จะมีค่าสูงตามไปด้วย และอีกประเด็นที่ต้องคำนึงถึง เมื่อโครงสร้าง รับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน โครงสร้างจะต้องไม่เกิดการเสียรูปมากเกินไปจนส่งผลกระทบต่อความเสียหาย สำหรับเกณฑ์กำหนดตัวคูณความปลอดภัยในอดีตที่ยังไม่มีข้อมูลการทดสอบและออกแบบ มากพอ มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างมักจะกำหนดใช้ตัวคูณความปลอดภัยจากความชำนาญในการออกแบบที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย โดยลดกำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้าง เช่น ลดกำลังรับแรงสูงสุดจากหน่วยแรงคราก F_y เป็น $0.60F_y$ และใช้เป็นค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นใน โครงสร้างเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเป็นหลักการออกแบบโครงสร้างโดยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้

(Allowable stress design, ASD) ตามมาตรฐานข้อกำหนด AISC ปี ค.ศ. 1923 – 1989 สำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็ก [10]

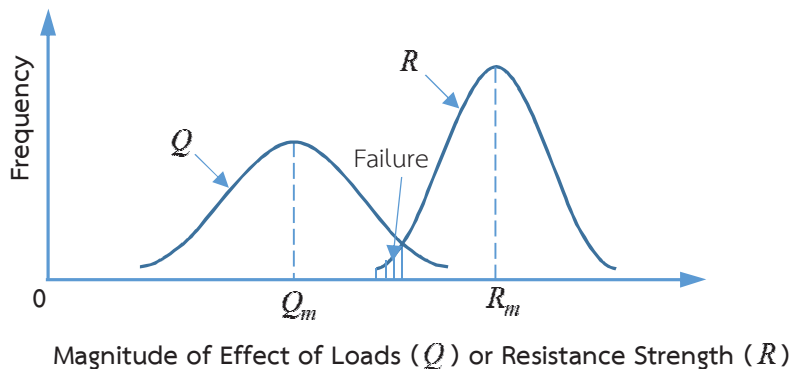
ในความเป็นจริงการวิบัติของโครงสร้างหรือส่วนของโครงสร้าง อาจเกิดจากหลายสาเหตุที่เป็นปัจจัยส่งผลกระทบต่อตัวคุณความปลอดภัย ทำให้กำลังรับแรงสูงสุดมีค่าไม่แน่นอน หรือหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีค่าไม่แน่นอน (Uncertainty) ซึ่งอาจมีสาเหตุดังนี้

- (1) การเปลี่ยนแปลงกำลังของวัสดุ เช่น การใช้วัสดุผิดประเภท การคืบ (Creeps) การกัดกร่อน (Corrosions) และการล้า (Fatigue)
- (2) วิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง (Method of structural analysis)
- (3) ภัยพิบัติจากแผ่นดินไหว และลมพายุ
- (4) การตัดแปลงขึ้นรูปและติดตั้งผิดพลาด (Fabrication and erection error)
- (5) การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีทำให้น้ำหนักบรรทุกจรเปลี่ยนไป เช่น น้ำหนักบรรทุกจากยานยนต์ (Traffic load)
- (6) การประมาณการน้ำหนักบรรทุกจรผิดพลาด
- (7) หน่วยแรงคงค้าง (Residual stresses) หน่วยแรงเข้มข้น (Stress concentrations) และการเปลี่ยนแปลงขนาดขององค์อาคารจากการเสื่อมสภาพ

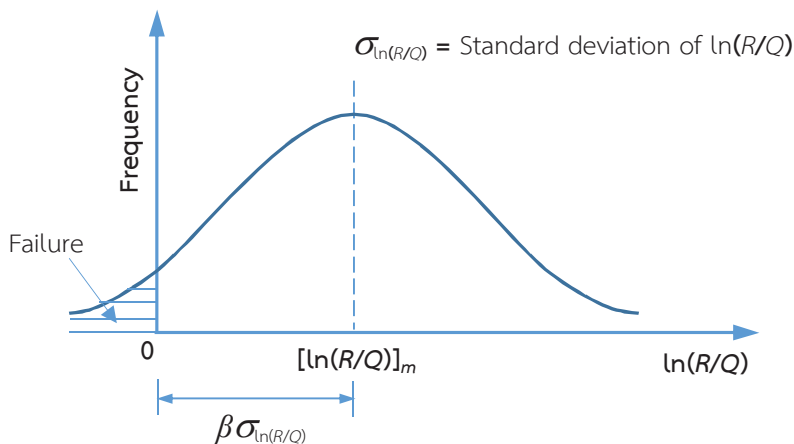
ความไม่แน่นอนดังกล่าวทำให้วิเคราะห์หาสถานะขีดจำกัดด้านกำลังของโครงสร้างให้ถูกต้องแม่นยำเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการวิเคราะห์ตัวแปรไม่แน่นอน (Uncertain variables) จึงอาศัยหลักการทางด้านสถิติ (Statistics) หรือหลักการความน่าจะเป็น (Probability) ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความแข็งแรง ปลอดภัย ประหยัด และมีความเสี่ยงต่อการวิบัติน้อยที่สุด เรียกวิธีวิเคราะห์นี้ว่า วิธีความน่าเชื่อถือ (Reliability method) โดยมีหลักการดังนี้ พิจารณารูปที่ 2.1 เป็นกราฟแจกแจงความถี่ปกติ (Normal distributions) ของหน่วยแรงสูงสุดหรือหน่วยแรงวิบัติที่เกิดขึ้นในองค์อาคารในกรณีต่าง ๆ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำ (Effect load, Q) และกำลังต้านทาน (Resistance strength, R) จะเห็นว่าเมื่อกำลังต้านทาน R มากกว่าหน่วยแรงวิบัติจากผลกระทบของน้ำหนักบรรทุก Q องค์อาคารของโครงสร้างมีความแข็งแรงและปลอดภัยเพียงพอ แต่ถ้าหน่วยแรงวิบัติ Q เกินกำลังต้านทาน R เป็นจำนวนมาก โครงสร้างมีความแข็งแรงไม่เพียงพอและมีความเสี่ยงต่อการวิบัติหรือถึงสถานะขีดจำกัดประลัยดังบริเวณพื้นที่แรเงา ซึ่งกำลัง

ต้านทาน R น้อยกว่าหน่วยแรงவிบัติ Q อย่างไรก็ตาม เป็นที่ยอมรับกันว่าไม่มีโครงสร้างใดที่ออกแบบโดยปราศจากความน่าจะเป็นที่โครงสร้างจะไม่เกิดการวิบัติ [11]

การวิเคราะห์สถานะขีดจำกัดด้านกำลังหรือการวิบัติของโครงสร้าง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และลอการิทึมธรรมชาติของ R/Q ($\ln(R/Q)$) ซึ่งเป็นกราฟแจกแจงความถี่ปกติ ดังรูปที่ 2.2 องค์อาคารของโครงสร้างที่น่าจะวิบัติหรือเข้าสู่สถานะขีดจำกัดด้านกำลังเป็นองค์อาคารที่อยู่บริเวณพื้นที่แรเงา ระยะระหว่างเส้นการวิบัติและค่ามัธยฐานของฟังก์ชัน $\ln(R/Q)$ $[\ln(R/Q)]_m$ มีค่าเท่ากับผลคูณของ β และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของลอการิทึมธรรมชาติ R/Q ($\beta\sigma_{\ln(R/Q)}$) ซึ่งตัวคูณ β เป็น ดัชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability index) ถ้าดัชนีความน่าเชื่อถือ β มีค่ามากเท่าใดโครงสร้างมีความแข็งแรงและปลอดภัยมากเท่านั้น [11]



รูปที่ 2.1 การแจกแจงความถี่ของน้ำหนักบรรทุก Q และกำลังต้านทาน R



รูปที่ 2.2 ดัชนีความน่าเชื่อถือ β (Reliability index β)

ความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างเขียนเป็นสูตรได้ ดังสมการ (2.2) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ปรากฏในมาตรฐาน AISC-1986 สำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็ก [10]

$$R_u \leq \phi R_n \quad \text{..... (2.2)}$$

$$R_u = \sum \gamma_i Q_i \quad \text{..... (2.3)}$$

โดยที่ ϕR_n = กำลังต้านทานที่ปลอดภัยหรือกำลังที่รับได้ (สภาวะขีดจำกัดต้านกำลัง)

R_n = กำลังต้านทานระบุ (Nominal resistance strength)

ϕ = ตัวคูณความต้านทาน (Resistance factor)

R_u = กำลังที่ต้องการ (Required strength) คำนวณหาได้จากผลรวมของน้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างที่เพิ่มค่าแล้ว ($\sum \gamma_i Q_i$)

Q_i = น้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้าง

γ_i = ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load factor)

2.2.2 วิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (LRFD)

การออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and resistance factor design, LRFD) ตามมาตรฐานข้อกำหนด ANSI/AISC 360-16 มีหลักเกณฑ์ในการออกแบบ ดังนี้ กำลังรับแรงที่ต้องการ R_u ต้องไม่เกินกำลังรับแรงออกแบบหรือกำลังรับแรงที่รับได้ ϕR_n (Design strength or Available strength) ดังสมการ (2.4) (ANSI/AISC 360-16, Eq. B3-1)

$$R_u \leq \phi R_n \quad \text{..... (2.4)}$$

โดยที่ ϕR_n = กำลังรับแรงออกแบบหรือกำลังรับแรงที่รับได้

R_n = กำลังรับแรงระบุ (Nominal strength)

ϕ = ตัวคูณความต้านทาน (Resistance factors)

R_u = กำลังรับแรงที่ต้องการ วิเคราะห์หาได้จากผลรวมของน้ำหนักบรรทุกทุกประเภทต่าง ๆ ที่เพิ่มค่าแล้วกระทำต่อโครงสร้างโดยวิธีทฤษฎีอีลาสติก ($\sum \gamma_i Q_i$)

Q_i = น้ำหนักบรรทุกทุกประเภทต่าง ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้าง

γ_i = ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load factors)

กำลังรับแรงที่ต้องการ R_u ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีทฤษฎีอีลาสติก ภายใต้ผลรวมน้ำหนักบรรทุกทุกประเภทต่าง ๆ ที่เพิ่มค่าแล้วกระทำต่อโครงสร้าง โดยใช้ค่ามากที่สุดในการออกแบบมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 กำหนดให้ใช้ผลรวมน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้วประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASCE/SEI 7-16 Minimum design loads for buildings and other structures [12] ดังนี้

- (1) $1.4D$
- (2) $1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
- (3) $1.2D + 1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R) + (0.5L \text{ or } 0.5W)$
- (4) $1.2D + 1.0W + \gamma_L L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
- (5) $1.2D \pm 1.0E + \gamma_L L + 0.2S$
- (6) $0.9D \pm 1.0W$
- (7) $0.9D \pm 1.0E$

- หมายเหตุ**
- ในกรณี 3 4 และ 5 ตัวคูณน้ำหนัก γ_L ของน้ำหนักบรรทุกจร L มีค่า 0.5 ($\gamma_L = 0.5$) สำหรับพื้นที่ที่มีน้ำหนักบรรทุกจรไม่เกิน 500 kg/m^2 และ $\gamma_L = 1.0$ สำหรับอาคารที่จอดรถ พื้นที่ห้องโถงอาคารสาธารณะประโยชน์ และพื้นที่ที่มีน้ำหนักบรรทุกจรมากกว่า 500 kg/m^2
 - ในกรณี 2 4 และ 5 น้ำหนักหิมะ S อาจจะเป็นน้ำหนักหิมะบนหลังคาราบ p_f (Flat roof snow load) หรือน้ำหนักหิมะบนหลังคาลาดเอียง p_s (Slop roof snow load)

โดยที่ D = น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load)

L = น้ำหนักบรรทุกจร (Live load)

L_r = น้ำหนักบรรทุกจรหลังคา (Roof live load)

R = น้ำหนักบรรทุกน้ำฝน (Rain load)

S = น้ำหนักบรรทุกหิมะ (Snow load)

W = แรงแลม (Wind load)

E = แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Earthquake load)

ตัวคูณความต้านทาน ϕ มีค่าขึ้นอยู่กับประเภทขององค์อาคารในการรับน้ำหนักบรรทุก และสถานะขีดจำกัดด้านกำลังหรือลักษณะการวิบัติ โดยปกติ $\phi \leq 1.0$

2.2.3 วิธีการที่ยอมให้ (ASD)

การออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีการที่ยอมให้ (Allowable strength design, ASD) ในอดีตเป็นวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress design, ASD) กำหนดใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1923 ตามมาตรฐานข้อกำหนด AISC-1923 Standard specification for design, fabrication and erection of structural steel for building [10] เป็นวิธีวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างเหล็กบนพื้นฐานสถานะการใช้งาน (Service states) มีหลักเกณฑ์ในการออกแบบ ดังนี้ หน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานต้องไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ตามกำหนด (Specified allowable stress) ค่าตัวคูณความปลอดภัยอยู่บนพื้นฐานของประสบการณ์และความชำนาญ ขณะที่ระดับความปลอดภัยที่แท้จริงไม่ทราบค่าและมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1986 AISC ได้กำหนดการออกแบบโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (LRFD) ในมาตรฐาน วิธีการออกแบบอยู่บนพื้นฐานการออกแบบสถานะขีดจำกัดด้านกำลัง และในปี ค.ศ. 1989 มาตรฐาน AISC ได้ปรับเปลี่ยนวิธีการออกแบบจากวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้เป็นวิธีการที่ยอมให้ เปลี่ยนหลักการออกแบบมาใช้หลักการบนพื้นฐานสถานะขีดจำกัดด้านกำลัง และน้ำหนักบรรทุกใช้งานมีหลักเกณฑ์ในการออกแบบ ดังนี้ กำลังรับแรงที่ต้องการ R_a (Required strength) ต้องไม่เกินกำลังรับแรงที่ยอมให้ R_n / Ω (Allowable strength design) ดังสมการ (2.5) (ANSI/AISC 360-16, Equation B3-2) เมื่อกำลังรับแรงที่ต้องการเป็นแรงภายในองค์อาคารที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีทฤษฎีอิลาสติกภายใต้ น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้วประเภทต่าง ๆ ($\sum Q_i$) กระทำ และกำลังรับแรงที่ยอมให้หาได้จากกำลังรับแรงระบุ R_n (Nominal strength, R_n)หารด้วยตัวคูณความปลอดภัย Ω (Safety factor, Ω)

$$R_a \leq R_n / \Omega \quad \text{..... (2.5)}$$

โดยที่ R_n / Ω = กำลังรับแรงที่ยอมให้ (Allowable strength)

R_n = กำลังรับแรงระบุ (Nominal strength)

Ω = ตัวคูณความปลอดภัยตามวิธีการที่ยอมให้ ASD (Safety factor)

R_a = กำลังรับแรงที่ต้องการ วิเคราะห์หาได้จากผลรวมของน้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างโดยวิธีทฤษฎีอีลาสติก ($\sum \gamma_i Q_i$)

Q_i = น้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้าง

γ_i = ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load factors)

กำลังรับแรงที่ต้องการ R_a ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีทฤษฎีอีลาสติกภายใต้ผลรวมน้ำหนักบรรทุกใช้งานประเภทต่าง ๆ กระทำต่อโครงสร้าง โดยใช้ค่ามากที่สุดในการออกแบบมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 กำหนดให้ใช้ผลรวมน้ำหนักบรรทุกที่ปรับค่าแล้วประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASCE/SEI 7-16 ดังนี้

(1) D

(2) $D + L$

(3) $D + (L_r \text{ or } S \text{ or } R)$

(4) $D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$

(5) $D \pm (0.6W \text{ or } 0.7E)$

(6a) $D + 0.75L + 0.75(0.6W) + 0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$

(6b) $D + 0.75L \pm 0.75(0.7E) + 0.75S$

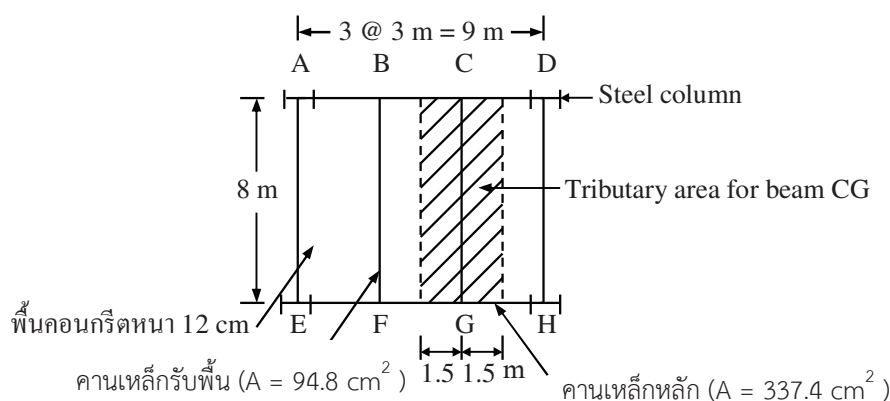
(7) $0.6D \pm 0.6W$

(8) $0.6D \pm 0.7E$

หมายเหตุ - ในกรณี 4 และ 6 น้ำหนักหิมะ S อาจจะเป็นน้ำหนักหิมะบนหลังคาราบ p_f หรือน้ำหนักหิมะบนหลังคาลาดเอียง p_s

ตัวคูณความปลอดภัย Ω มีค่าขึ้นอยู่กับประเภทขององค์อาคารในการรับน้ำหนักบรรทุกและรูปแบบของการวิบัติ โดยปกติ $\Omega \geq 1.0$

ตัวอย่างที่ 2.1 ระบบพื้นของอาคาร ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 12 cm หล่อพาดบนคานเหล็ก 4 ตัว และคานเหล็กดังกล่าววางพาดบนคานเหล็กหลัก (Steel girder) 2 ตัว พื้นที่หน้าตัดของคานรับพื้นและคานหลักมีขนาด 94.8 cm^2 และ 337.4 cm^2 ตามลำดับ เมื่อระบบพื้นรองรับน้ำหนักบรรทุกจร 500 kg/m^2 จงหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดกระทำต่อคาน CG และ DH และคานหลัก AD ตามข้อกำหนดของวิธี LRFD และ ASD



รูปที่ 2.1 ระบบพื้นคาน Ex2.1

วิธีทำ

(1) หาน้ำหนักบรรทุกส่งถ่ายลงคาน CG และ DH

อัตราส่วน s/l ของแผ่นพื้น $= 3/8 = 0.375 < 0.5$ เป็นแผ่นพื้นทางเดียว

พื้นที่แรงแรงกว้าง 3 m เป็นพื้นที่แบ่งปัน (Tributary area) จาก 1/2 ของระยะระหว่างคาน BC (FG) บวก 1/2 ของระยะระหว่างคาน CD (GH) คูณกับความยาวคาน CG ยาว 8 m จะได้พื้นที่รองรับด้วยคาน CG มีขนาด $3 \times 8 = 24 \text{ m}^2$ และพื้นที่รองรับด้วยคาน DH มีขนาด $1.5 \times 8 = 12 \text{ m}^2$

1.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่

1.1.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ลงคาน CG

- น้ำหนักจากพื้น $= 2,400(0.12)(3) = 864 \text{ kg/m}$
- น้ำหนักของคาน $CG = 7,850(94.8 \times 10^{-4}) = 74.4 \text{ kg/m}$
- น้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมด (D) $= 864 + 74.4 = 938.4 \text{ kg/m}$

1.1.2 น้ำหนักบรรทุกคงที่ลงคาน DH

- น้ำหนักจากพื้น $= 2,400(0.12)(1.5) = 432 \text{ kg/m}$
- น้ำหนักของคาน $DH = 7,850(94.8 \times 10^{-4}) = 74.4 \text{ kg/m}$
- น้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมด (D) $= 432 + 74.4 = 506.4 \text{ kg/m}$

1.2 น้ำหนักบรรทุกจร

1.2.1 น้ำหนักบรรทุกจรลงคาน CG

- น้ำหนักบรรทุกจรจากพื้น (L) $= 500(3) = 1,500 \text{ kg/m}$

1.2.2 น้ำหนักบรรทุกจรลงคาน DH

- น้ำหนักบรรทุกจรจากพื้น (L) $= 500(1.5) = 750 \text{ kg/m}$

(2) น้ำหนักบรรทุกสูงสุดกระทำต่อคาน CG DH และคานหลัก AD โดยวิธี LRFD2.1 หาน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้วกระทำต่อคาน CG และ DH

ผลรวมน้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่เพิ่มค่าแล้วกระทำต่อคาน CG และ DH ดังตารางที่ 2.1

2.2 หาน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้วกระทำต่อคาน AD

น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอที่เพิ่มค่าแล้วกระทำต่อคาน BF เป็นค่าเดียวกับกระทำต่อคาน CG ฉะนั้นแรงปฏิกิริยาจากคานทั้งสองกระทำต่อคานหลัก AD ที่จุด B และ C ดังรูปที่ 2.2(ค)

$$P_u = 3,526(8)/4 = 14,104 \text{ kg}$$

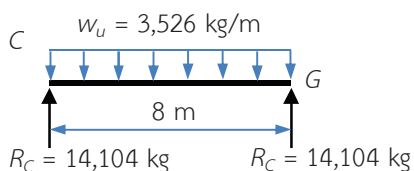
น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอที่เพิ่มค่าแล้วกระทำต่อคาน AD ต้องเป็นกรณีเดียวกับแรงปฏิกิริยาจากคาน CG และ DH ดังรูปที่ 2.2(ค) จะได้

$$W_u = 1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$$

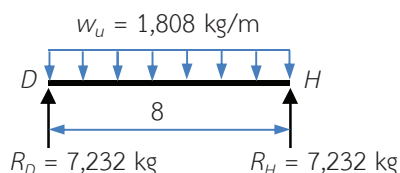
$$W_u = 1.2(7,850)(337.4/10,000) + 1.6(0) + 0.5(0) = 318 \text{ kg/m}$$

ตารางที่ 2.1 ผลรวมน้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่เพิ่มค่าแล้วตามวิธี LRFD

กรณีรวมน้ำหนักบรรทุก	น้ำหนักบรรทุกลงคาน CG	น้ำหนักบรรทุกลงคาน DH
1. $1.4D$	$w_u = 1.4(938.4) = 1,314$	$w_u = 1.4(506.4) = 709$
2. $1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$	$w_u = 1.2(938.4) + 1.6(1,500)$ $= 3,526 *$	$w_u = 1.2(506.4) + 1.6(750)$ $= 1,808 *$
3. $1.2D + 1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R) + \gamma_L L$ or $0.5W$	$w_u = 1.2(938.4) + 1.0(1,500)$ $= 2,626$	$w_u = 1.2(506.4) + 1.0(750)$ $= 1,358$
4. $1.2D + 1.0W + \gamma_L L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$	$w_u = 1.2(938.4) + 1.0(1,500)$ $= 2,626$	$w_u = 1.2(506.4) + 1.0(750)$ $= 1,358$
5. $1.2D + 1.0E + \gamma_L L + 0.2S$	$w_u = 1.2(938.4) + 1.0(1,500)$ $= 2,626$	$w_u = 1.2(506.4) + 1.0(750)$ $= 1,358$
6. $0.9D + 1.0W$	$w_u = 0.9(938.4) + 1.0(0)$ $= 845$	$w_u = 0.9(506.4) + 1.0(0)$ $= 456$ $w_u = 0.9(506.4) + 1.0(0)$ $= 456$
น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่าแล้วมากที่สุด	$w_u = 3,526 \text{ kg/m}$ กรณีที่ 2 ควบคุม ดังรูปที่ 2.2(ก)	$w_u = 1,808 \text{ kg/m}$ กรณีที่ 2 ควบคุม ดังรูปที่ 2.2(ข)

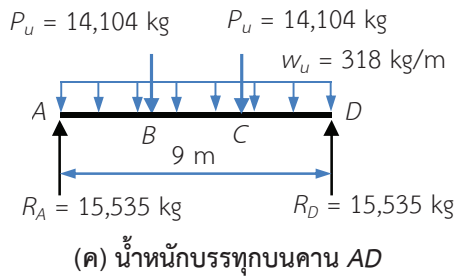


(ก) น้ำหนักบรรทุกบนคาน CG



(ข) น้ำหนักบรรทุกบนคาน DH

รูปที่ 2.2 คำตอบของตัวอย่าง 2.1 กรณีวิเคราะห์โดยวิธี LRFD



รูปที่ 2.2 คำตอบของตัวอย่าง 2.1 กรณีวิเคราะห์โดยวิธี LRFD (ต่อ)

(3) น้ำหนักบรรทุกสูงสุดกระทำต่อคาน CG DH และคานหลัก AD โดยวิธี ASD

3.1 หาผลรวมน้ำหนักบรรทุกใช้งานสูงสุดกระทำต่อคาน CG และ DH

ผลรวมน้ำหนักบรรทุกใช้งานประเภทต่าง ๆ กระทำต่อคาน CG และ DH ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลรวมน้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่ใช้งานตามวิธี ASD

กรณีรวมน้ำหนักบรรทุก	น้ำหนักบรรทุกลงคาน CG	น้ำหนักบรรทุกลงคาน DH
1. D	$w_a = 938.4$	$w_a = 506.4$
2. $D + L$	$w_a = 938.4 + 1,500 = 2,438.4$	$w_a = 506.4 + 750 = 1,256.4$
3. $D + (L_r \text{ or } S \text{ or } R)$	$w_a = 938.4 + 0 = 938.4$	$w_a = 506.4 + 0 = 506.4$
4. $D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$	$w_a = 938.4 + 0.75(1,500) + 0$ $= 2,063.4$	$w_a = 506.4 + 0.75(750) + 0$ $= 1,068.9$
5. $D + 0.6W \text{ or } 0.7E$	$w_a = 938.4 + 0 = 938.4$	$w_a = 506.4 + 0 = 506.4$
6a. $D + 0.75L + 0.75(0.6W) + 0.75(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$	$w_a = 938.4 + 0.75(1,500)$ $= 2,063.4$	$w_a = 506.4 + 0.75(750)$ $= 1,068.9$
6b. $D + 0.75L + 0.75(0.7E) + 0.75S$	$w_a = 938.4 + 0.75(1,500) + 0$ $= 2,063.4$	$w_a = 506.4 + 0.75(750) + 0$ $= 1,068.9$
7. $0.6D + 0.6W$	$w_a = 0.6(938.4) + 0 = 563$ $w_a = 0.6(938.4) + 0 = 563$	$w_a = 0.6(506.4) + 0 = 303.8$ $w_a = 0.6(506.4) + 0 = 303.8$
8. $0.6D + 0.7E$	$w_a = 0.6(938.4) + 0 = 563$ $w_a = 0.6(938.4) + 0 = 563$	$w_a = 0.6(506.4) + 0 = 303.8$ $w_a = 0.6(506.4) + 0 = 303.8$
น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่าแล้วมากที่สุด	$w_u = 2,438.4 \text{ kg/m}$ กรณีที่ 2 ควบคุม ดังรูปที่ 2.3(ก)	$w_u = 1,256.4 \text{ kg/m}$ กรณีที่ 2 ควบคุม ดังรูปที่ 2.3(ข)

3.2 หาผลรวมน้ำหนักบรรทุกใช้งานกระทำต่อคาน AD

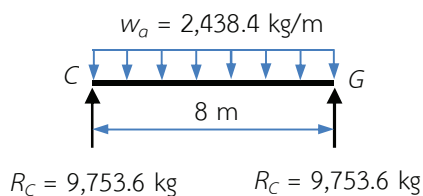
ผลรวมน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอใช้งานสูงสุดกระทำต่อคาน BF เป็นค่าเดียวกับกระทำต่อคาน CG ฉะนั้นแรงปฏิกิริยาจากคานทั้งสองกระทำต่อคาน AD ที่จุด B และ C ดังรูปที่ 2.3(ค)

$$P_u = 2,438.4(8)/4 = 9,753.6 \text{ kg}$$

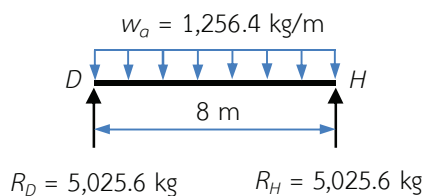
ผลรวมน้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอใช้งานกระทำต่อคาน AD ต้องเป็นกรณีเดียวกับแรงปฏิกิริยาจากคาน CG และ DH ดังรูปที่ 2.3(ค) จะได้

$$W_a = D + L = 7,850(337.4/10,000) + (0)$$

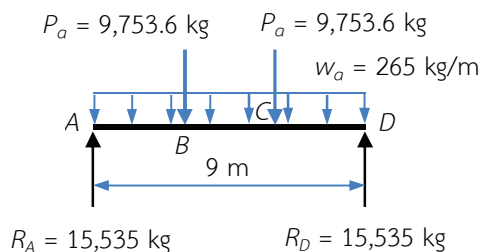
$$W_a = 265 \text{ kg/m}$$



(ก) น้ำหนักบรรทุกทุกบนคาน CG



(ข) น้ำหนักบรรทุกทุกบนคาน DH



(ค) น้ำหนักบรรทุกทุกบนคาน AD

รูปที่ 2.3 คำตอบของตัวอย่าง 2.1 กรณีวิเคราะห์โดยวิธี ASD

2.3 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้าง

2.3.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) เป็นน้ำหนักของตัวโครงสร้าง มีขนาดและตำแหน่งที่กระทำแน่นอน ในการออกแบบโครงสร้างจำเป็นต้องสมมติขนาดขององค์อาคารหรือขนาดน้ำหนักบรรทุกคงที่ก่อน ข้อมูลนี้เป็นเพียงข้อมูลที่คาดการณ์เท่านั้นไม่ใช่ข้อมูลจริง ถ้าการประมาณไม่สอดคล้องต้องกลับไปออกแบบใหม่ สำหรับน้ำหนักของตัวโครงสร้างขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้และหน่วยน้ำหนักของวัสดุนั้น ๆ หน่วยน้ำหนักของวัสดุในงานก่อสร้างที่ควรทราบดังตารางที่ 2.3 และน้ำหนักของวัสดุก่อสร้าง ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 หน่วยน้ำหนักของวัสดุในงานก่อสร้าง

วัสดุในงานก่อสร้าง	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)
เหล็กโครงสร้าง (Structural Steel)	7,850
อะลูมิเนียม (Aluminum)	2,700
คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete)	2,400
อิฐ (Brick)	1,900
ไม้ (Wood)	650
กระจก (Glass)	2,560

ตารางที่ 2.4 หน่วยน้ำหนักของวัสดุก่อสร้าง [14]

วัสดุก่อสร้าง	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ²)
1. วัสดุผนังหลังคา	
- กระเบื้องซีแพคโมเนีย	45
- กระเบื้องลอนคู่	15
- กระเบื้องลูกฟูกลอนเล็ก	12
- กระเบื้องลูกฟูกลอนใหญ่	17
- สังกะสี	5
- เมทัลชีท (Metal sheet)	5
- เมทัลชีทเคลือบฉนวนพียูโฟม (PU-foam metal sheet) หนา 2"	7
2. แป้นไม้	5
3. โครงหลังคา	25
4. ฝ้า	
- ฝ้าไม้ @ 40 x 40 cm	15
- ฝ้าไม้ @ 60 x 60 cm	10
- กระเบื้องแผ่นเรียบหนา 4 mm	7
- กระเบื้องแผ่นเรียบหนา 6 mm	11
- แผ่นเรียบยิปซัม หนา 9 mm	6
- แผ่นเรียบยิปซัม หนา 12 mm	8
5. ฝ้าผนัง กำแพง	
- ฝ้าแผ่นเรียบซีเมนต์ หนา 8 mm 2 ด้านรวมโครงซีไลน์	50
- ฝ้าแผ่นเรียบซีเมนต์ หนา 10 mm 2 ด้านรวมโครงซีไลน์	55
- ฝ้าแผ่นเรียบซีเมนต์ หนา 12 mm 2 ด้านรวมโครงซีไลน์	60
- ฝ้าไม้อัดซีบอร์ดด้านเดียวรวมโครง	12
- ฝ้าไม้อัดซีบอร์ด 2 ด้านรวมโครง	15
- อิฐมอญ หนา 10 cm (ก่อครึ่งแผ่น)	180
- อิฐมอญ หนา 15 cm	310
- อิฐมอญ หนา 20 cm (ก่อเต็มแผ่น)	360
- อิฐบล็อก หนา 10 cm	100

ตารางที่ 2.4 หน่วยน้ำหนักของวัสดุก่อสร้าง (ต่อ)

วัสดุก่อสร้าง	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ²)
- อิฐบล็อก หนา 15 cm	150
- อิฐบล็อก หนา 20 cm	200
- บล็อกแก้ว หนา 3 "	90
6 พื้น	
- กระเบื้องปูพื้นรวมวัสดุรองพื้น	48
- พื้นหินขัด หนา 1 "	80
- พื้นไม้ หนา 1 " รวมตง	30
- ปาเก้ไม้สัก หนา ½ "	10
- ปาเก้ไม้แดง หนา ½ "	14

2.3.2 น้ำหนักบรรทุกจร

น้ำหนักบรรทุกจร (Live load) เป็นน้ำหนักบรรทุกที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ไม่ได้กระทำอย่างถาวร ทำให้อาคารและตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานการณ์ หรืออาจเป็นแรงที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติ เช่น แรงลม (Wind load) และแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (Earthquake load) เป็นต้น

น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำบนแผ่นพื้นของอาคาร เป็นน้ำหนักบรรทุกจรกระทำในแนวดิ่ง หรือกระทำตั้งฉากกับแผ่นพื้นตามแนวแรงดึงดูดของโลก สามารถเคลื่อนย้ายได้จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งบนโครงสร้าง เช่น คน เฟอร์นิเจอร์ รถยนต์ และสินค้า เป็นต้น โดยทั่วไป สมมติให้เป็นน้ำหนักบรรทุกแบบกระจายสม่ำเสมอ มีขนาดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และลักษณะการใช้งานอาคาร น้ำหนักบรรทุกจรมักถูกกำหนดโดยกฎหมายหรือเทศบัญญัติของแต่ละท้องถิ่น ในประเทศไทย ออกเป็นกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ว่าด้วยการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของวัสดุที่ใช้และพื้นดินที่รองรับอาคาร ข้อ 15 และข้อ 19 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 [13] ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับประเภทและส่วนต่าง ๆ ของอาคาร

ประเภทและส่วนต่าง ๆ ของอาคาร	น้ำหนักบรรทุกจร (kg/m ²)
(1) หลังคา*	30
(2) กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต	100
(3) ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม	150
(4) ห้องแถว ตึกแถวที่ใช้พักอาศัย อาคารชุด หอพัก โรงแรม และห้องคนไข้พิเศษของโรงพยาบาล	200
(5) สำนักงาน ธนาคาร	250
(6) (ก) อาคารพาณิชย์ ส่วนของห้องแถว ตึกแถวที่ใช้เพื่อการพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย โรงเรียน และโรงพยาบาล	300
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารชุดหอพัก โรงแรม สำนักงาน และธนาคาร	300
(7) (ก) ตลาด อาคารสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องประชุมห้องอ่านหนังสือในห้องสมุดหรือหอสมุด ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์นั่ง หรือรถจักรยานยนต์	400
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย และโรงเรียน	400
(8) (ก) คลังสินค้า โรงกีฬา พิพิธภัณฑสถาน อิมจิณฑ์ โรงงานอุตสาหกรรม โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสารและพัสดุ	500
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของตลาด อาคารสรรพสินค้า ห้องประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องสมุดและหอสมุด	500
(9) ห้องเก็บหนังสือของห้องสมุดหรือหอสมุด	600
(10) ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่า	800

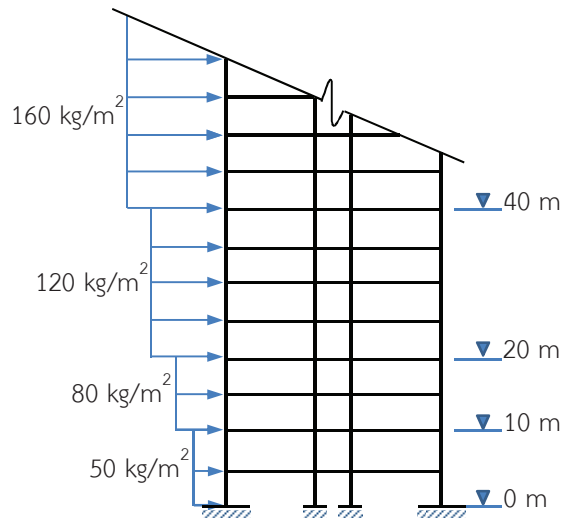
หมายเหตุ : * เทศบัญญัติกรุงเทพฯ กำหนดน้ำหนักบรรทุกจรของหลังคา ไม่น้อยกว่า 50 kg/m²

2.4 แรงลม

แรงลม (Wind load) เป็นแรงที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของลมปะทะอาคาร ซึ่งเป็นแรงพลศาสตร์ ขนาดที่กระทำต่ออาคารขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของที่ตั้งอาคาร สิ่งกีดขวางบริเวณรอบ ๆ อาคาร รูปทรงอาคาร และคุณสมบัติการสั่นไหวของตัวอาคาร เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์มาตรฐานต่าง ๆ นิยมประมาณค่าแรงลมเป็นแรงสถิตเทียบเท่ากระทำต่ออาคาร

2.4.1 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527)

กระทรวงมหาดไทยได้ตรากฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 ข้อ 17 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 [13] กำหนดแรงลมที่กระทำต่ออาคาร ดังรูปที่ 2.4 และตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.4 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527)

ตารางที่ 2.7 หน่วยแรงลมตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527)

ประเภทและส่วนต่าง ๆ ของอาคาร	น้ำหนักบรรทุกทุกจุด (kg/m^2)
(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 หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าโดยวิธีการอย่างง่ายตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50

วิธีวิเคราะห์หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าโดยวิธีอย่างง่าย ตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 [15] กำหนดให้ใช้กับระบบโครงสร้างและส่วนของโครงสร้าง ดังนี้

(1) ระบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม (Main wind-force resistant system) ของอาคารเดี่ยว และอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร ($H \leq 80 \text{ m}$) และความสูงต้องไม่เกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด ($H \leq 3W$) ให้พิจารณาจากทิศทางลมในทุกทิศทาง เมื่อความกว้างในด้านที่น้อยกว่ามีความยาวไม่เท่ากันในแต่ละความสูง ให้คำนวณตามสมการ (2.6)

(2) ผนังภายนอกอาคาร (Cladding) ของอาคารทุกประเภท

(3) ยกเว้นอาคารที่สั้นไหว่ง่าย ได้แก่ อาคารที่มีน้ำหนักเบา และมีความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ต่ำ และมีคุณสมบัติความหน่วง (Damping properties) ของอาคารต่ำ

$$W = \frac{\sum h_i W_i}{\sum h_i} \quad \dots\dots (2.6)$$

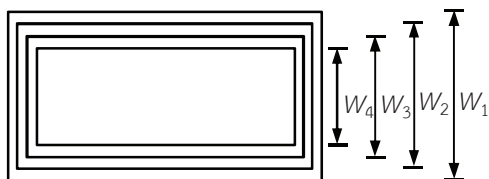
โดยที่ $\sum$ = ผลรวมของทุกชั้นของอาคาร

h_i = ความสูงจากพื้นดิน ถึงพื้นที่ชั้นที่ i

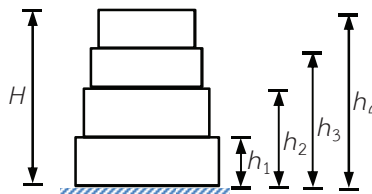
W_i = ความกว้างของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมที่ความสูง h_i

จากรูปที่ 2.5 ความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด $W = \left(\frac{h_1 W_1 + h_2 W_2 + h_3 W_3 + h_4 W_4}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4} \right)$

ความสูงของอาคาร $H \leq 80 \text{ m}$ และ $H \leq 3W$



(ก) แปลน



(ข) รูปตัดขวาง

รูปที่ 2.5 สัดส่วนของอาคารสำหรับการวิเคราะห์แรงลมโดยวิธีอย่างง่าย

1) หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า

(1) หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า (Equivalent static wind pressure) กระทำต่อพื้นผิวภายนอกอาคารในทิศทางลม คำนวณได้จากสมการ (2.7)

$$p = I_w q C_e C_g C_p \quad \text{..... (2.7)}$$

โดยที่ p = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่ากระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายนอกอาคาร ค่าบวก (+) มีทิศเข้าหาพื้นผิวเป็นหน่วยแรงดัน และค่าลบ (-) มีทิศพุ่งออกจากพื้นผิวเป็นหน่วยแรงดูด

I_w = ตัวคูณประกอบความสำคัญของแรงลม

q = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม, kg/m^2

C_e = ตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (Exposure factor)

C_g = ตัวคูณประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (Gust effect factor)

C_p = สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (External pressure coefficient)

(2) หน่วยแรงลมสุทธิเพื่อใช้ในการคำนวณแรงลมที่กระทำต่อส่วนใดส่วนหนึ่งของด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร เช่น ผนังภายนอก หรือ หลังคา เป็นต้น ซึ่งเป็นผลรวมแบบเวกเตอร์ของหน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายนอก ดังรายละเอียดในหัวข้อ (1) กับหน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายใน โดยที่หน่วยแรงลมภายใน คำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$p_i = I_w q C_e C_{gi} C_{pi} \quad \text{..... (2.8)}$$

โดยที่ p_i = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่ากระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายในอาคาร ค่าบวก (+) มีทิศเข้าหาพื้นผิวเป็นหน่วยแรงดัน และค่าลบ (-) มีทิศพุ่งออกจากพื้นผิวเป็นหน่วยแรงดูด

C_{gi} = ตัวคูณประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลมที่กระทำภายในอาคาร

C_{pi} = สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร

2) ตัวคูณประกอบความสำคัญของแรงลม (I_w)

ตัวคูณประกอบความสำคัญของแรงลม (I_w) ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้อาคารตามความสำคัญต่อสาธารณชน ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตัวคูณประกอบความสำคัญของอาคารต่อสาธารณชน I_w

ประเภทของอาคาร	ความสำคัญ	I_w สภาวะจำกัดด้าน	
		กำลัง	ใช้งาน
อาคารและส่วนโครงสร้างที่มีปัจจัยเสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ค่อนข้างน้อย เมื่อเกิดการพังทลายของอาคารหรือส่วนโครงสร้างนั้น ๆ เช่น - อาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร - อาคารชั่วคราว - อาคารเก็บของเล็ก ๆ ซึ่งไม่มีความสำคัญ	น้อย	0.8	0.75
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่ไม่จัดอยู่ในอาคารประเภท ความสำคัญ น้อย มาก และสูงมาก	ปกติ	1	0.75
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่หากเกิดการพังทลาย จะเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสาธารณชนอย่างมาก เช่น - อาคารที่เป็นที่ชุมนุมในพื้นที่หนึ่งๆ มากกว่า 300 คน - โรงเรียนประถมหรือมัธยมศึกษาที่มีความจุมากกว่า 250 คน - มหาวิทยาลัยหรือวิทยาลัยที่มีความจุมากกว่า 500 คน - สถานรักษาพยาบาลที่มีความจุคนไข้มากกว่า 50 คน แต่ไม่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - เรือนจำและสถานกักกันนักโทษ	มาก	1.15	0.75
อาคารและส่วนโครงสร้างที่มีความจำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชนเป็นอย่างมาก หรือจำเป็นต่อการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุเป็นอย่างมาก เช่น - โรงพยาบาลที่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิง และโรงเก็บรถฉุกเฉินต่าง ๆ - โรงไฟฟ้า - โรงผลิตน้ำประปา ถังเก็บน้ำ และสถานีสูบน้ำที่มีความดันสูงสำหรับการดับเพลิง - อาคารศูนย์สื่อสาร - อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย - ท่าอากาศยาน ศูนย์บังคับการบิน และโรงเก็บเครื่องบิน ที่ต้องใช้กรณีฉุกเฉิน - อาคารศูนย์บัญชาการแห่งชาติ อาคารหรือส่วนโครงสร้างในส่วนของการผลิต การจัดการ การจัดเก็บ หรือการใช้สารพิษ เช่น เชื้อเพลิง หรือสารเคมี อันก่อให้เกิดการระเบิดขึ้นได้	มากที่สุด	1.15	0.75

3) หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q)

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม คำนวณได้จากสมการ (2.9)

$$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 \quad \text{..... (2.9)}$$

โดยที่ q = หน่วยแรงลมอ้างอิง, N/m^2

$$\text{หรือ} \quad q = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{g} \right) \bar{V}^2 \quad \text{..... (2.10)}$$

โดยที่ q = หน่วยแรงลมอ้างอิง, kg/m^2

ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศ, kg/m^3 ($\rho \approx 1.25 \text{ kg/m}^3$ วัดที่ความดันบรรยากาศปกติและอุณหภูมิของอากาศประมาณ $15 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$)

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2 ($g = 9.806 \text{ m/s}^2$)

$\bar{V}$ = ความเร็วลมอ้างอิง, m/s (ความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 m จากพื้นดินในสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง (Open exposure) สำหรับคาบเวลากลับ 50 ปี (Return period, V_{50}) ยกเว้นกลุ่ม 4A และ 4B

สำหรับการออกแบบที่สถานะขีดจำกัดด้านการใช้งาน (Serviceability limit state) ความเร็วลมอ้างอิง คำนวณได้จากสมการ (2.11) และสำหรับการออกแบบที่สถานะขีดจำกัดด้านกำลัง (Ultimate limit state) ความเร็วลมอ้างอิง คำนวณได้จากสมการ (2.12)

$$\bar{V} = V_{50} \quad \text{..... (2.11)}$$

$$\bar{V} = T_F V_{50} \quad \text{..... (2.12)}$$

โดยที่ T_F = ตัวคูณประกอบได้ฝุ่น

มาตรฐาน มยผ. 1311-50 จำแนกความเร็วลมอ้างอิงในพื้นที่ 77 จังหวัด ของประเทศไทยเป็น 5 กลุ่ม ดังรูปที่ 2.6 และตารางที่ 2.9 แต่ละกลุ่มใช้ความเร็วลมอ้างอิงและตัวคูณประกอบได้ฝุ่น ดังนี้

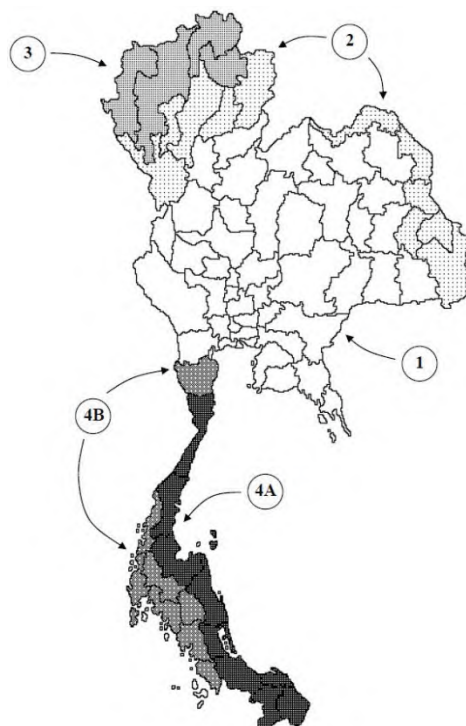
กลุ่มที่ 1 $V_{50} = 25 \text{ m/s}; T_F = 1.0$

กลุ่มที่ 2 $V_{50} = 27 \text{ m/s}; T_F = 1.0$

กลุ่มที่ 3 $V_{50} = 29 \text{ m/s}; T_F = 1.0$

กลุ่มที่ 4A $V_{50} = 25 \text{ m/s}; T_F = 1.2$

กลุ่มที่ 4B $V_{50} = 25 \text{ m/s}; T_F = 1.08$



รูปที่ 2.6 แผนที่การแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงในประเทศไทย [13]

ตารางที่ 2.9 การจำแนกกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงในประเทศไทย

กลุ่ม	ภาคเหนือ	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	ภาคตะวันออก
1	กำแพงเพชร ตาก (อ. อุ้มผาง) นครสวรรค์ พิจิตร พิษณุโลก เพชรบูรณ์ สุโขทัย อุตรดิตถ์ อุทัยธานี	กาฬสินธุ์ ขอนแก่น ชัยภูมิ นครราชสีมา บุรีรัมย์ มหาสารคาม ร้อยเอ็ด เลย ศรีสะเกษ สกลนคร สุรินทร์ หนองบัวลำภู อุดรธานี	จันทบุรี ชลบุรี ตราด ระยอง
2	ตาก (นอกเหนือจาก อ. อุ้มผาง) น่าน แพร่ ลำปาง ลำพูน	นครพนม บึงกาฬ มุกดาหาร ยโสธร หนองคาย อำนาจเจริญ อุบลราชธานี	
3	เชียงใหม่ เชียงราย พะเยา แม่ฮ่องสอน		

ตารางที่ 2.9 การจำแนกกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงในประเทศไทย (ต่อ)

กลุ่ม	ภาคกลาง	ภาคใต้
1	กรุงเทพมหานคร กาญจนบุรี ฉะเชิงเทรา ชัยนาท นครนายก นครปฐม นนทบุรี ปราชินบุรี ปทุมธานี ราชบุรี ลพบุรี สระบุรี สิงห์บุรี สุพรรณบุรี สมุทรปราการ สมุทรสงคราม สระแก้ว อัญญา อ่างทอง	
4A	ประจวบคีรีขันธ์	ชุมพร นครศรีธรรมราช (อ. เมือง อ. ขนอม อ. สีชล อ. ท่าศาลา อ. พิปูน อ. พรหมคีรี อ. ลานสกา อ. ร่อนพิบูลย์ อ. พนัง อ. เขียว ใหญ่ อ. หัวไทร อ. สะอาด) นราธิวาส ปัตตานี พัทลุง ยะลา สงขลา สุราษฎร์ธานี (อ. เมือง อ. ท่าชนะ อ. ไชยา อ. ท่าฉาง อ. คีรีรัฐนิคม อ. พุนพิน อ. กาญจนดิษฐ์ อ. ดอนสัก อ. บ้านนาเดิม อ. บ้านนาสาร อ. เกาะสมุย อ. เกาะพะงัน)
4B	เพชรบุรี	กระบี่ ตรัง นครศรีธรรมราช (พื้นที่ นอกเหนือจากกลุ่ม 4A) พังงา ภูเก็ต ระนอง สตูล สุราษฎร์ธานี (พื้นที่นอกเหนือจากกลุ่ม 4A)

4) ตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมให้แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ

(1) ตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ

สภาพภูมิประเทศของที่ตั้งอาคารเพื่อกำหนดค่าตัวคูณประกอบในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

สภาพภูมิประเทศแบบ A เป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่ง บริเวณที่ตั้งอาคารมีอาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้าง กระจัดกระจายอยู่ห่างๆ กัน หรือเป็นบริเวณชายฝั่งทะเล ดังรูปที่ 2.7 ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (2.13) หรือใช้ค่าจากตารางที่ 2.10

$$C_e = \left(\frac{z}{10} \right)^{0.2} \quad \text{..... (2.13)}$$

โดยที่ z = ความสูงจากพื้นดิน ณ ตำแหน่งที่คำนวณค่าหน่วยแรงลม, m

C_e = ตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ ถ้าค่าที่ได้จากสมการ (2.13) มีค่าน้อยกว่า 0.9 ให้ใช้ค่า $C_e = 0.9$



รูปที่ 2.7 สภาพภูมิประเทศแบบ A (สภาพภูมิประเทศแบบโล่ง) [13]

สภาพภูมิประเทศแบบ B เป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง บริเวณที่ตั้งอาคาร มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.8 ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ (2.14) หรือใช้ค่าจากตารางที่ 2.10

$$C_e = 0.7 \left(\frac{z}{12} \right)^{0.3} \quad \text{..... (2.14)}$$

เมื่อค่า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ (2.14) มีค่าน้อยกว่า 0.7 ให้ใช้ค่า $C_e = 0.7$

สภาพภูมิประเทศใดๆ จะจัดอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ B ได้ ก็ต่อเมื่อมีลักษณะภูมิประเทศในลักษณะนั้นๆ สม่าเสมอในทิศทางต้นลม เป็นระยะทางไม่ต่ำกว่า 1 km หรือ 10 เท่าของความสูงของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่า ซึ่งสภาพภูมิประเทศที่ใช้ในการคำนวณนี้ ควรสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศที่แท้จริงในทิศทางลมที่พิจารณา

ข้อยกเว้น อาคารที่มีความสูงไม่เกิน 80 m และตั้งอยู่ในกลุ่มที่มีความเร็วลมอ้างอิง $\bar{V} = T_F V_{50}$ ไม่เกิน 25 m/s ในรูปที่ 2.6 ให้ใช้เฉพาะสภาพภูมิประเทศแบบ A เท่านั้น



รูปที่ 2.8 สภาพภูมิประเทศแบบ B (สภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง) [13]

ตารางที่ 2.10 ตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ความสูงจากพื้นดิน (z), m	สภาพภูมิประเทศแบบ A	สภาพภูมิประเทศแบบ B
$z \leq 6$	0.90	0.70
$6 < z \leq 10$	1.00	0.70
$10 < z \leq 20$	1.15	0.82
$20 < z \leq 30$	1.25	0.92
$30 < z \leq 40$	1.32	1.00
$40 < z \leq 60$	1.43	1.13
$60 < z \leq 80$	1.52	1.24

(2) การเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน

อาคารหรือโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณเนินเขาและลาดชัน ที่มีอัตราส่วนระยะทางแนวตั้งต่อแนวราบมากกว่า 1 ต่อ 10 (5.7 องศา) มีผลทำให้ความเร็วลมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากกว่าลมที่พัดผ่านบริเวณแบบราบ ให้ใช้ค่าตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศลาดชัน (C_e^*) ดังสมการ (2.15)

$$C_e^* = C_e (1 + \Delta S(z))^2 \quad \text{..... (2.15)}$$

โดยที่ $\Delta S(z)$ = ตัวประกอบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมเฉลี่ยบริเวณเนินเขาและลาดชัน ดังรูปที่ 2.9

C_e^* = ตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศลาดชันใช้แทนตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศแบบราบ และคำนวณภายในระยะทาง $|x| < kL_h$ จะได้ค่า C_e^* ดังสมการ (2.16)

$$C_e^* = C_e \left\{ 1 + \Delta S_{\max} \left(1 - \frac{|x|}{kL_h} \right) e^{(-az/L_h)} \right\}^2 \quad \text{..... (2.16)}$$

โดยที่ C_e = ตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศบริเวณแบบราบ

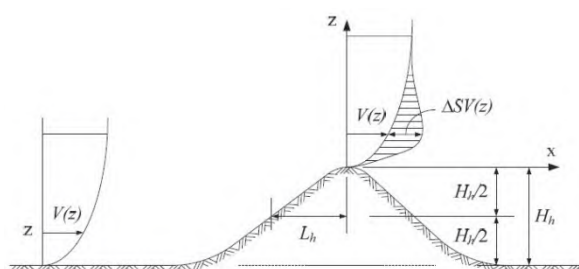
$\Delta S_{\max}$ = ตัวประกอบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมเฉลี่ยบริเวณเนินเขาและลาดชัน

a = สัมประสิทธิ์ตัวลดความเร็วลมตามความสูง

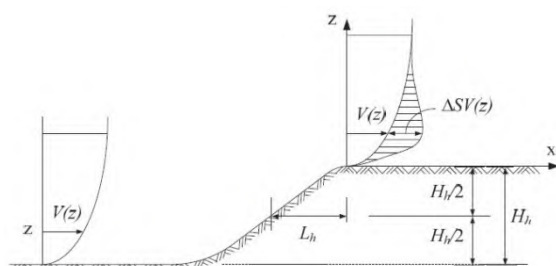
H_b = ความสูงของเนินเขาและลาดชัน

L_b = ระยะทางในแนวราบด้านต้นลมจากยอดเนินเขาถึงระยะ $H_b/2$

ค่า $\Delta S_{\max}$ และ a ขึ้นอยู่กับรูปร่างและความชันของเนินเขา ดังตารางที่ 2.11



(ก) บริเวณเนินเขา



(ข) บริเวณลาดชัน

รูปที่ 2.9 การเพิ่มขึ้นของความเร็วมบริเวณเนินเขาและลาดชัน [15]

ตารางที่ 2.11 ตัวคูณประกอบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน

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

หมายเหตุ : สำหรับอัตราส่วน $H_h / L_h > 0.5$ ให้ใช้ $H_h / L_h = 0.5$ และแทนค่า

$$L_h = 2H_h \text{ เมื่อคำนวณ } C_e^* \text{ ในสมการ (2.16)}$$

5) ตัวคูณประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (C_g)

ตัวคูณประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม คือ อัตราส่วนระหว่างผลของแรงลมสูงสุดต่อผลของแรงลมเฉลี่ย ตัวคูณประกอบ C_g คำนวณได้ดังนี้

(1) ตัวคูณประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมกระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร

(ก) ตัวคูณประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่กระทำต่อพื้นผิวภายนอกอาคาร สำหรับออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม ให้ใช้ $C_g = 2.0$ ยกเว้นป้ายและกำแพงให้ใช้ $C_g = 2.35$

(ข) การออกแบบโครงสร้างรองและผนังภายนอกอาคาร (Cladding) ที่มีขนาดเล็ก (ประมาณขนาดของหน้าต่าง) ให้ใช้ $C_g = 2.50$

(2) ตัวคูณประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่กระทำในอาคาร

หน่วยแรงลมสถิติเทียบเท่าที่กระทำต่อพื้นผิวภายในอาคาร ให้ใช้ $C_{gi} = 2.0$ หรือค่าที่คำนวณจากสมการ (2.17) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและปริมาณช่องเปิดของอาคาร (Opening) ในกรณีที่อาคารมีขนาดใหญ่และไม่มีผนังภายในจะทำให้ปริมาตรภายในของอาคารมีค่ามาก ความดันลมภายในอาคารจะมีการแปรเปลี่ยนช้า เมื่อเปรียบเทียบกับ การแปรเปลี่ยนของความดันลมภายนอกอาคาร ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้ อาจใช้ค่าที่คำนวณจากสมการ (2.17)

$$C_{gi} = 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \tau}} \quad \text{..... (2.17)}$$

โดยที่ τ = ตัวแปรที่บอกระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันภายนอกอาคาร คำนวณได้จากสมการ (2.18)

$$\tau = \frac{V_o}{6,950 A_o} \quad \text{..... (2.18)}$$

โดยที่ V_o = ปริมาตรภายในของอาคาร, m^3

A_o = พื้นที่รวมทั้งหมดของช่องเปิดบนผนังภายนอกอาคาร, m^2

(3) ตัวคูณประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมที่ปรับแก้จากผลการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมบริเวณเนินเขาและลาดชัน (C_g^*)

(ก) ลมที่พัดผ่านบริเวณเนินเขาและลาดชัน จะทำให้ความเร็วลมเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แต่ไม่ทำให้ขนาดการแปรปรวนของความเร็วลมเพิ่มขึ้น จึงต้องปรับแก้ตัวคูณประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม ค่า C_g^* คำนวณได้จากสมการ (2.19)

$$C_g^* = 1 + (C_g - 1) \sqrt{\frac{C_e}{C_e^*}} \quad \text{..... (2.19)}$$

โดยที่ C_g = ตัวคูณประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมในบริเวณแบบราบ ในหัวข้อ (1) และหัวข้อ (2)

(ข) การปรับแก้ผลคูณของ $C_p C_g$ สำหรับอาคารเดี่ยวที่ตั้งอยู่บริเวณเนินเขาและลาดชันทำได้โดย คูณค่า $C_p C_g$ ด้วยอัตราส่วน C_g^* / C_g โดยที่ C_g คำนวณได้จากหัวข้อ (1) และ C_g^* คำนวณได้จากสมการ (2.19)

6) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p)

(1) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร

สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกอาคาร ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคาร ทิศทางลม และการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมตามความสูงอาคาร ค่า C_p สำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารและระบบโครงสร้างหลักของอาคาร มีรายละเอียด ดังนี้

(ก) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกสำหรับอาคารเดี่ยว เป็นอาคารที่มีความสูงต่อความกว้างน้อยกว่า 1 ($H/D_s < 1$) เมื่อ D_s คือ ความกว้างของด้านที่แคบที่สุด และมีความสูงอ้างอิง (Reference height) ไม่เกิน 23 เมตร ($H \leq 23$ m) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมได้ถูกนำมารวมกับตัวคูณประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม ($C_p C_g$) ดังนี้

กรณีที่ 1 สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลัก หลังคาทรงจั่ว (Gable roof) ให้คำนึงถึงผลกระทบของแรงลมกระทำต่อพื้นที่ผิวทุกด้านของอาคารในเวลาเดียว ค่า $C_p C_g$ ดังรูปที่ 2.10 มีรายละเอียดในการออกแบบ ดังนี้

(1) อาคารต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงลมได้ในทุกทิศทาง โดยที่ทั้ง 4 มุมของอาคารต้องได้รับการพิจารณาให้เป็นมุมที่รับแรงลม (Windward corner) ดังรูปที่ 2.10 แรงลมที่กระทำต้องพิจารณาแยกเป็นแรงกระทำกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 เพื่อคำนวณค่าแรงกระทำในส่วนต่างๆ รวมทั้งแรงบิดที่เกิดขึ้นกับระบบโครงสร้าง

(2) หลังคาที่มีองศาความชันเป็นค่าอื่นที่ไม่ได้แสดงไว้ในตารางในรูปที่ 2.10 ให้เทียบบัญญัติไตรยางค์เพื่อคำนวณค่า $C_p C_g$ จากค่าที่แสดงไว้ในตาราง

(3) ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้หน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 6(2)

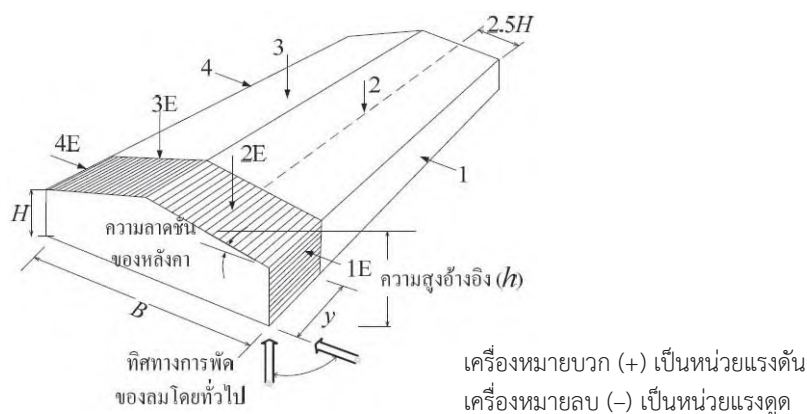
(4) การออกแบบฐานราก ยกเว้นส่วนที่ยึดโครงอาคารกับฐานราก (Anchorages) ให้ใช้ค่าร้อยละ 70 ของน้ำหนักประสิทธิผล (Effective load) ในการออกแบบ

(5) ความสูงอ้างอิง (h) ให้ใช้ความสูงที่วัดถึงจุดกึ่งกลางของหลังคาทั้งนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 6 เมตร ในกรณีความชันของหลังคาน้อยกว่า 7° สามารถใช้ความสูงของชายคาแทนได้

(6) ความกว้าง (z) ของพื้นที่บริเวณขอบของผนังหน้าจั่ว (Gable wall) มีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าระหว่างร้อยละ 10 ของด้านที่แคบที่สุดและร้อยละ 40 ของความสูง (H) ทั้งนี้ค่า z ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 4 ของด้านที่แคบที่สุดและไม่น้อยกว่า 1 m

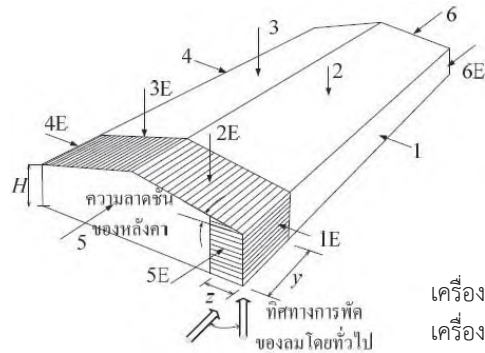
(7) ความกว้าง (y) ของพื้นที่บริเวณขอบอาคาร (End zone) มีค่าเท่ากับค่าที่มากกว่าระหว่าง 6 m และ $2z$ สำหรับอาคารที่สร้างขึ้นจากโครงข้อแข็ง (Frame) หลายๆ ตัวมาประกอบกัน ค่า y อาจจะพิจารณาให้มีค่าเท่ากับระยะที่วัดจากขอบของอาคารถึงโครงข้อแข็งภายในตัวแรก (First interior frame)

(8) สำหรับแรงลมกระทำในกรณีที่ 1 กับอาคารที่มีค่า $B/H > 5$ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าลบบนพื้นผิว 2 และ 2E ควรจะใช้กับพื้นที่ที่มีความกว้าง $2.5H$ จากขอบของอาคารด้านปะทะลมเท่านั้น บริเวณส่วนที่เหลือบนพื้นผิว 2 และ 2E กำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กับพื้นผิว 3 และ 3E ตามลำดับ



ความลาดชัน ของหลังคา	พื้นผิวของอาคาร							
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E
0° ถึง 5°	0.75	1.15	- 1.30	- 2.00	- 0.70	- 1.00	- 0.55	- 0.80
20°	1.00	1.50	- 1.30	- 2.00	- 0.90	- 1.30	- 0.80	- 1.20
30° ถึง 45°	1.05	1.30	0.40	0.50	- 0.80	- 1.00	- 0.70	- 0.90
90°	1.05	1.30	1.05	1.30	- 0.70	- 0.90	- 0.70	- 0.90

(ก) กรณีที่ 1 ลมพัดตามแนวตั้งฉากกับสันหลังคา



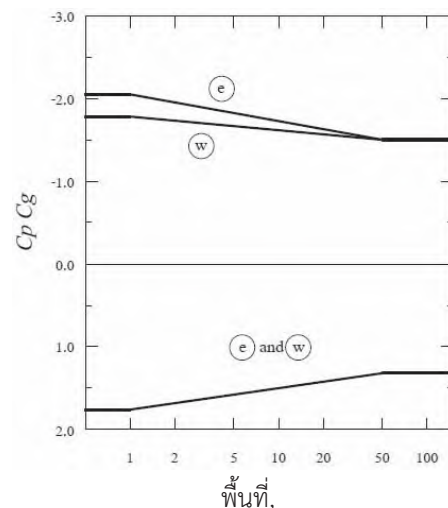
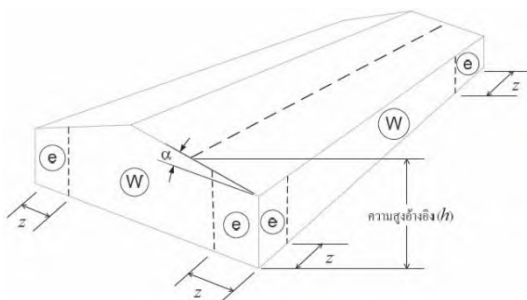
เครื่องหมายบวก (+) เป็นหน่วยแรงดัน
เครื่องหมายลบ (-) เป็นหน่วยแรงดูด

ความลาดชัน ของหลังคา	พื้นผิวของอาคาร											
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E	5	5E	6	6E
0° ถึง 90°	-0.85	-0.9	-1.3	-2.0	-0.7	-1.0	-0.85	-0.9	0.75	1.15	-0.55	-0.8

(ข) กรณีที่ 2 ลมพัดตามแนวนานกับสันหลังคา

รูปที่ 2.10 ค่า $C_p C_g$ สูงสุด สำหรับใช้ออกแบบโครงสร้างหลัก

กรณีที่ 2 สำหรับการออกแบบผนังภายนอกและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (Secondary structural members) หลังคาทรงจั่วที่มีความชันใด ๆ ค่า $C_p C_g$ สูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร ดังรูปที่ 2.11 มีรายละเอียดในการออกแบบ ดังนี้



รูปที่ 2.11 ค่า $C_p C_g$ สูงสุดกระทำภายนอกอาคาร ใช้สำหรับออกแบบผนังภายนอกและชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง

(1) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมกระทำต่อผนังอาคารในแต่ละโซนมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ให้ใช้เพื่อการคำนวณค่าหน่วยแรงดันสูงสุดและหน่วยแรงดูดสูงสุด โดยพิจารณาถึงผลของแรงลมในทุกทิศทางแล้ว สามารถประยุกต์ใช้กับหลังคาทรงจั่วทุกๆ ความชัน

(2) ค่าในแกน x ของกราฟที่แสดงในรูป คือ พื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (Design tributary area) ในแต่ละโซน

(3) ความกว้าง (z) เป็นค่าที่น้อยกว่าระหว่างร้อยละ 10 ของด้านที่แคบที่สุดและร้อยละ 40 ของความสูง H ทั้งนี้ค่า z ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 4 ของด้านที่แคบที่สุดและต้องไม่น้อยกว่า 1 m

(4) ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้หน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 6(2)

(5) ความสูงอ้างอิง (h) ให้ใช้ความสูงที่วัดถึงจุดกึ่งกลางของหลังคา แต่ทั้งนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 6 m

(6) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าแรงลมสำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารได้ทุกประเภท ยกเว้นในกรณีที่มีครีบนวดตั้ง (Vertical ribs) ที่มีความลึกมากกว่า 1 m ยึดติดอยู่กับระบบผนังภายนอกอาคาร ให้ใช้ค่า $C_p C_g = -2.8$ กระทำต่อโซน e ของอาคาร

กรณีที่ 3 สำหรับการออกแบบหลังคาทรงจั่วที่มีความชันไม่เกิน 7° ($\alpha \leq 7^\circ$) และขึ้นส่วนของโครงสร้างรอง ค่า $C_p C_g$ สูงสุดที่กระทำภายนอกอาคารบนพื้นผิวของหลังคา ดังรูปที่ 2.12 มีรายละเอียดในการออกแบบ ดังนี้

(1) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมกระทำต่อหลังคาในแต่ละโซนมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ให้ใช้เพื่อการคำนวณค่าหน่วยแรงสูงสุดโดยพิจารณาถึงผลของแรงลมในทุกทิศทางแล้ว

(2) กรณีที่หลังคามีส່ว่นยื่น (Roof with overhang) หน่วยแรงลมลัพท์ที่กระทำต่อส่วนยื่นจะเป็นผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำต่อพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่าง สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมลัพท์ที่กระทำต่อส่วนยื่นดังกล่าวแสดงโดยกราฟมี สัญลักษณ์ O หน้า

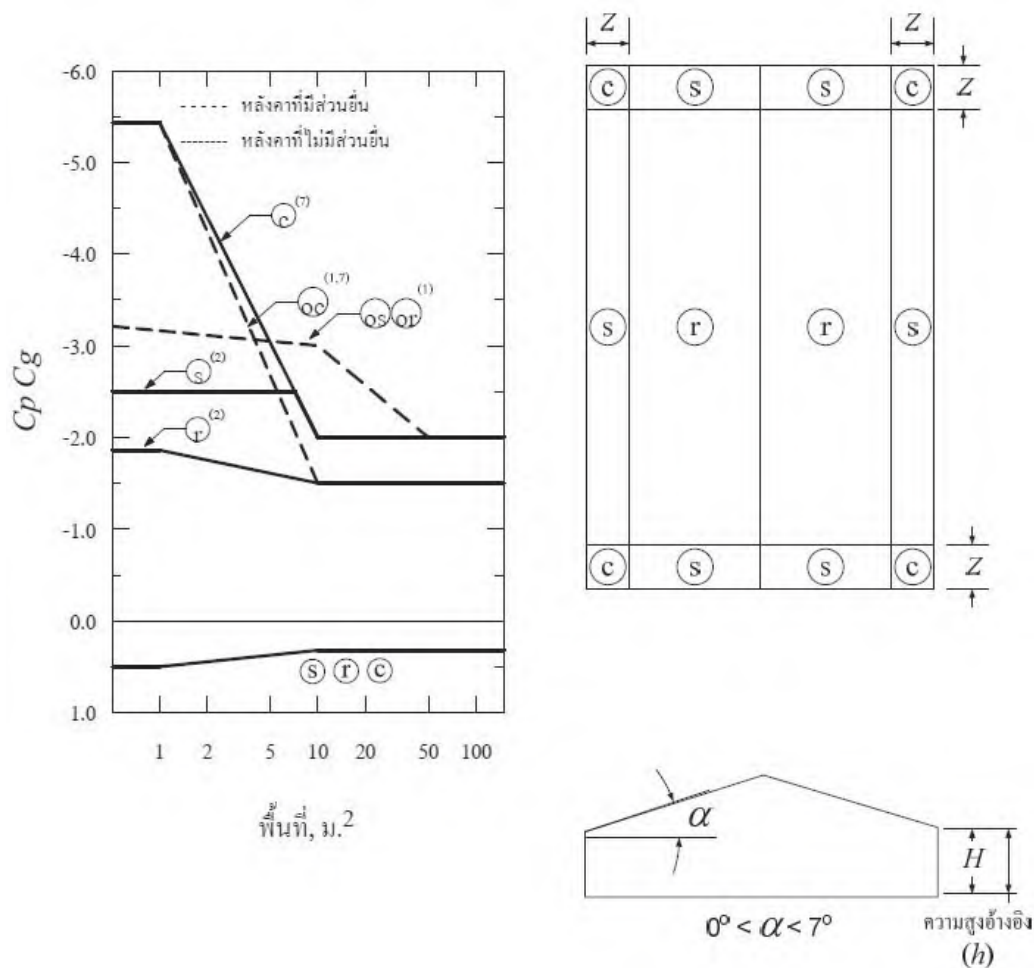
(3) กรณีที่หลังคามีส່ว่นยื่นและไม่มีส่วนยื่น ค่าสัมประสิทธิ์จากกราฟที่ใช้สัญลักษณ์ s, r และ c มีไว้เพื่อใช้คำนวณหน่วยแรงลมที่กระทำต่อพื้นผิวด้านบนของหลังคาในโซน s, r และ c ตามลำดับ

(4) ค่าในแกน x ของกราฟ เป็นพื้นที่รับลมขององค์อาคารที่ออกแบบ (Design tributary area) ในแต่ละโซน

(5) ความกว้าง (z) ใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่างร้อยละ 10 ของด้านที่แคบที่สุดและร้อยละ 40 ของความสูง H ทั้งนี้ z ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 4 ของด้านที่แคบที่สุดและไม่น้อยกว่า 1 m

(6) ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำทั้งจากภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้หน่วยแรงลมที่ถูกต้องสำหรับออกแบบ ทั้งนี้สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 6(2)

(7) การออกแบบหน่วยแรงดูดของหลังคาที่มีพื้นที่รับลมขององค์อาคารมากกว่า 100 m^2 และมีศูนย์กลางของพื้นที่รับลมขององค์อาคารห่างจากขอบหลังคามากกว่า $2H$ ให้ลดค่า $C_p C_g$ ลงเหลือ -1.1 ที่ $x/H = 2$ และลดค่าลงเชิงเส้นเหลือ -0.6 ที่ $x/H = 5$ โดยที่ x = ระยะห่างจากขอบหลังคา และ H = ความสูงของหลังคา



รูปที่ 2.12 ค่า $C_p C_g$ สูงสุดกระทำภายนอกอาคารบนพื้นผิวของหลังคาทรงจั่วที่มีความลาดชันน้อยกว่า 7° สำหรับใช้ออกแบบหลังคาและชิ้นส่วนของโครงสร้างรองรับ

(ข) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอกสำหรับอาคารสูง เป็นอาคารที่มีความสูงต่อความกว้างอย่างน้อย 1 ($H / D_s \geq 1$) และมีความสูงอ้างอิงเกิน 23 m แต่ไม่เกิน 80 m ($23 < H \leq 80$ m) ดังรูปที่ 2.13 มีรายละเอียดในการออกแบบ ดังนี้

(1) ขนาดของอาคารในแนวราบ กำหนดให้ความลึก (D) ของอาคารเป็นระยะในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางลม และความกว้าง (W) ของอาคารเป็นระยะในแนวขนานกับทิศทางลม

(2) การคำนวณค่าแรงลมที่กระทำต่ออาคารโดยรวม ให้ใช้ค่า C_p สำหรับออกแบบหลังคาและผนังแต่ละด้านให้เหมาะสม ดังรูปที่ 2.13

(3) กรณีที่แรงลมกระทำในทิศทางที่ไม่อยู่ในแนวตั้งฉากกับผนังอาคาร จะทำให้เกิดแรงดูดเฉพาะที่อย่างสูงบนพื้นผิวด้านต่างๆ ของอาคาร ในการออกแบบผนังภายนอกที่มีขนาดเล็ก (ประมาณขนาดของหน้าต่าง) แรงลมบนผนังและพื้นผิวหลังคาของอาคาร ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉพาะที่ (C_p^*) ในการคำนวณค่าแรงดูด โดยไม่ต้องนำค่า C_p^* มาใช้ร่วมกับค่า C_p สำหรับการคำนวณแรงลมที่กระทำกับอาคารโดยรวม

(4) ต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกและจากภายในอาคาร เพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงลมที่ถูกต้อง ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร C_{pi} ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 6(2)

(5) ความสูงอ้างอิงเพื่อใช้ในการคำนวณหาตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) กำหนดให้ใช้ตามรายละเอียด ดังนี้

(ก) การคำนวณหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคารบนผนังด้านปะทะ (Windward walls) ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = z (ความสูงเหนือพื้นดิน)

(ข) การคำนวณหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคารบนหลังคาและพื้นผิวด้านข้างของอาคาร ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = H (ความสูงทั้งหมดของอาคาร)

(ค) การคำนวณหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคารบนผนังด้านหลบลม (Leeward walls) ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = $0.5H$

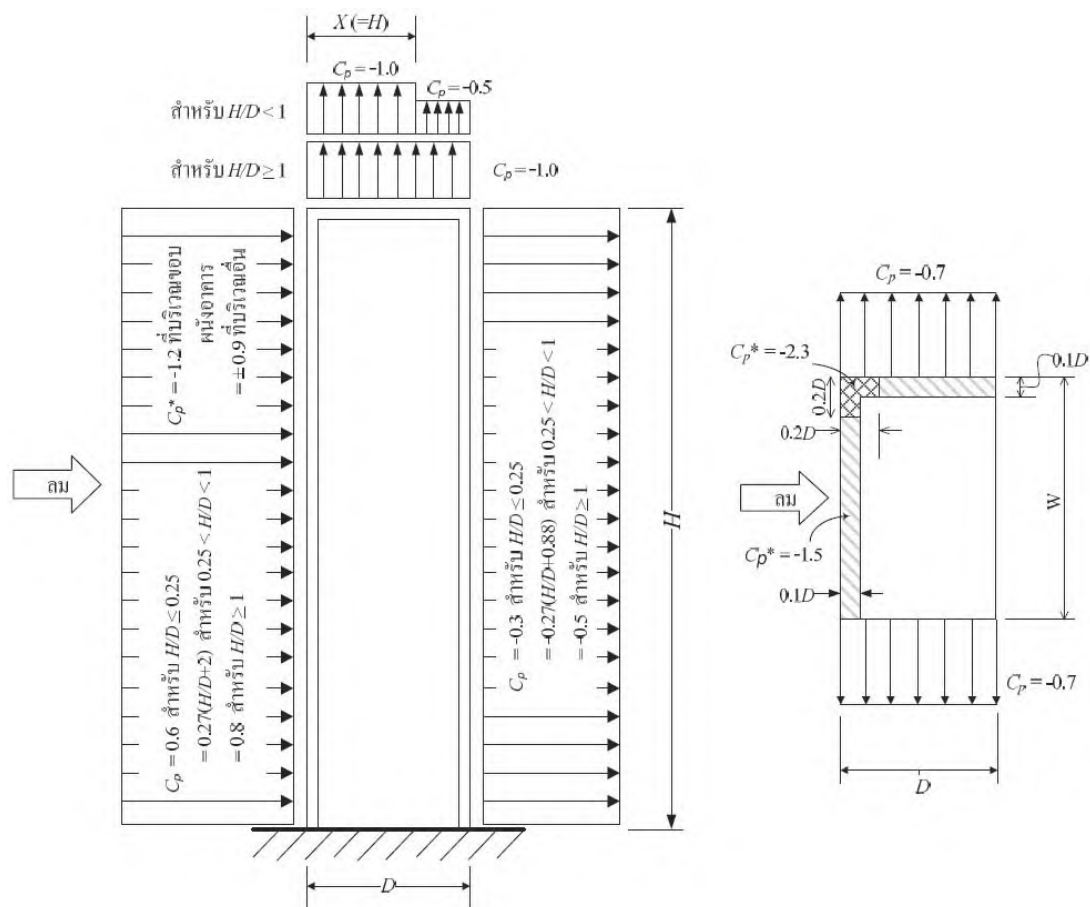
(ง) กรณีใช้ C_p^* เพื่อคำนวณหน่วยแรงดูดเฉพาะที่ ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = H

(จ) การคำนวณหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคาร ให้ใช้ความสูงอ้างอิง = กึ่งหนึ่งของความสูงทั้งหมดของอาคาร ($0.5H$)

(ฉ) การคำนวณหน่วยแรงลมที่กระทำภายในอาคารที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ให้ใช้ความสูงอ้างอิง เท่ากับความสูงของช่องเปิดนั้นวัดเหนือพื้นดิน

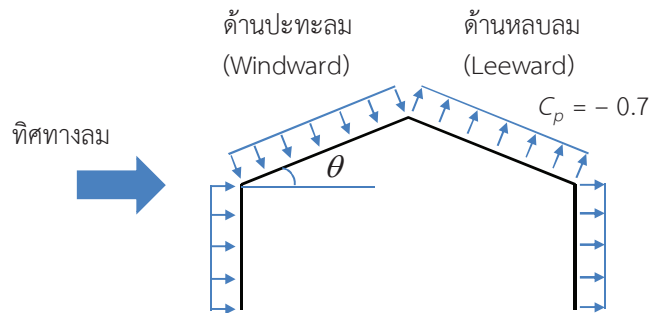
(6) พื้นที่ยกของผนังอาคาร ให้ใช้ $C_p^* = -1.2$ กระทำกับพื้นที่ที่กว้าง $0.1D$ จากขอบของอาคาร ยกเว้นผนังภายนอกที่มีคืบขนาดใหญ่ในแนวดิ่งที่มีความลึกมากกว่า 1 m ให้ใช้

ค่า $C_p^* = -1.4$ เพื่อใช้คำนวณหน่วยแรงลมเฉพาะที่ที่กระทำต่อพื้นที่บริเวณขอบของอาคารที่กว้างเท่ากับ $0.2D$ จากขอบของอาคาร



รูปที่ 2.13 สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p) และหน่วยแรงลมเฉพาะที่ (C_p^*)

หมายเหตุ กรณีระบบโครงสร้างหลักเป็นโครงข้อแข็งทรงจั่ว (Gable rigid frames) หรือมีหลังคาทรงจั่ว มาตรฐาน มยผ. 1131-50 ไม่ได้บัญญัติสัมประสิทธิ์ของแรงลมที่กระทำหลังคา อาจใช้กรณีหน่วยแรงลมกระทำต่อหลังคาทรงจั่วตามมาตรฐาน UBC-1997 [16] ในการคำนวณค่าตัวคูณประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศและการกระโชกของลม, C_e ให้ใช้ระดับความสูงเฉลี่ยของหลังคา และสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม, C_p ขึ้นอยู่กับองศาความชันหลังคาและทิศทางลม ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 หน่วยแรงลมกระทำต่อโครงข้อแข็งทรงจั่ว

- ด้านปะทะลม

$$C_p = -0.7 \quad \text{เมื่อ } \theta < 10^\circ$$

$$-0.9 \leq C_p < 0.3 \quad \text{เมื่อ } 10 \leq \theta < 37^\circ$$

$$C_p = 0.4 \quad \text{เมื่อ } 37^\circ \leq \theta < 45^\circ$$

- ด้านหลบลม

$$C_p = -0.7$$

(2) สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายใน (C_{pi})

สัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายใน C_{pi} ใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงลมภายในอาคาร ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบผนังภายนอกอาคาร และระบบโครงสร้างหลักต้านแรงลม สัมประสิทธิ์ C_{pi} ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวและขนาดของรอยรั่วซึมตลอดจนช่องเปิดบนผนังภายนอกอาคารและหลังคา ในการออกแบบอาคารสามารถพิจารณาได้เป็น 3 กรณี ดังนี้ และทุกกรณีต้องคำนวณหาค่า C_{gi} เพื่อใช้ในการคำนวณหน่วยแรงลมภายในอาคาร

กรณีที่ 1 $C_{pi} = -0.15$ ถึง 0.0

กรณีนี้ใช้กับอาคารที่ปราศจากช่องเปิดขนาดใหญ่ แต่อาจมีช่องเปิดเล็ก ๆ กระจายสม่ำเสมอ โดยมีพื้นที่ช่องเปิดรวมน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด เช่น อาคารสูงทั่ว ๆ ไป ที่มีผนังปิดล้อมทุกด้านและมีระบบระบายอากาศภายใน และอาคารเดี่ยวบางประเภท เช่น