ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างเหล็ก

โรงงานและโกดัง และ อาคารสำนักงาน

หนังสือโครงสร้างเหล็ก ดร.มงคล จิรวัชรเดช

1. บทนำ

การเรียนรู้ที่ดีที่สุดคือการศึกษาจากตัวอย่างที่เคยมีการทำมาก่อนหน้านี้แล้ว โดยเฉพาะในงานออกแบบโครงสร้างด้วยแล้วนั้น แม้ว่าในบทที่ผ่านมาเราจะได้กล่าวถึงทฤษฎี สมการ และข้อกำหนดต่างๆมากมาย แต่ในการออกแบบโครงสร้างนั้นผู้ออกแบบต้องสร้างแนวคิด กำหนดระบบโครงสร้างที่จะใช้ ระหว่างทำการออกแบบจะมีการประมาณค่าที่ต้องใช้ในการคำนวณ เมื่อคำนวณได้ผลออกมาก็ต้องมาพิจารณาว่าผลที่ได้ออกมานั้นมีความเหมาะสมหรือไม่ ซึ่งดุลพินิจในการออกแบบเหล่านี้จะได้มาจากประสบการณ์ในการทำงานจริงภายใต้การดูแลของวิศวกรผู้เชี่ยวชาญ ในบทนี้เราจะศึกษาจากงานออกแบบที่ผ่านมาโดยหวังว่าเมื่อออกไปทำงานจริงแล้วจะมีส่วนช่วยให้ปรับตัวในการเรียนรู้จากการทำงานได้ดีขึ้น

ขอเน้นย้ำอีกครั้งว่าตัวอย่างการออกแบบต่างๆที่มีปรากฏอยู่ในบทนี้มีไว้เพื่อให้ผู้เรียนศึกษาแนวคิดที่ใช้ในการออกแบบ มิใช่มีไว้เพื่อให้ลอกเลียนแบบโดยปราศจากความรู้ความเข้าใจ เพราะนั่นอาจจะทำให้เกิดปัญหาและความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน

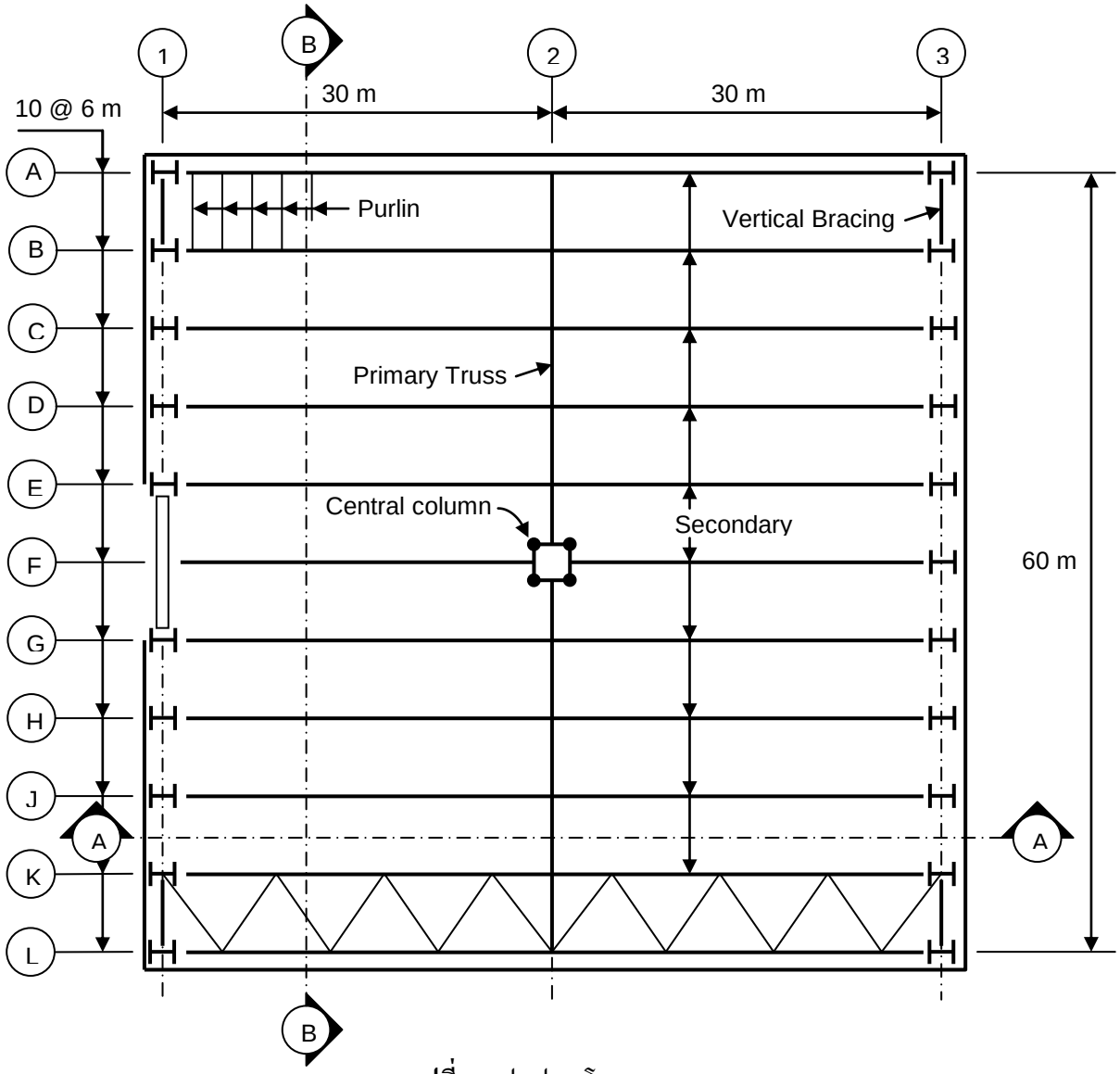
2. โรงงานและโกดัง

เป็นอาคารชั้นเดียวขนาดใหญ่ แปลนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้างด้านละ 60 เมตรดังแสดงในรูปที่ 17.1 สถาปนิกผู้ออกแบบต้องการให้มีเสาเพียงหนึ่งต้นกลางอาคาร วัสดุมุงหลังคาคือเหล็กรีดลอน ระยะช่องว่างความสูงอาคารที่ต้องการคือ 6 เมตร

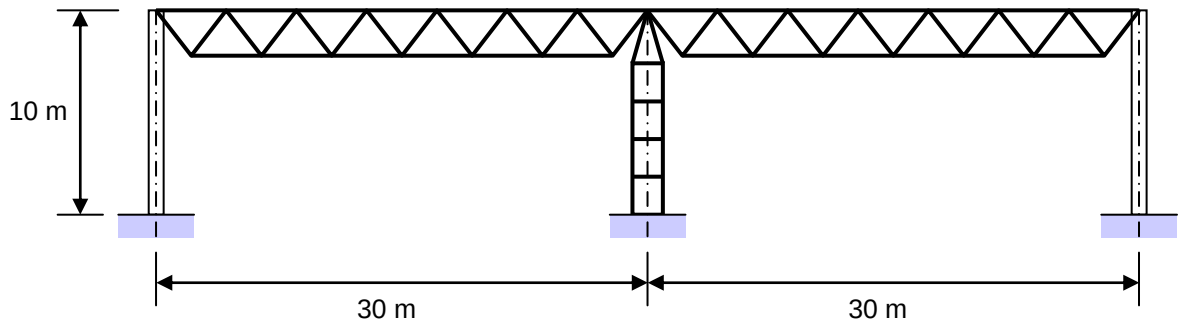
น้ำหนักบรรทุกจร:

น้ำหนักบรรทุกจรบนหลังคา	50	ก.ก./ม.^{2}
ความเร็วลมพื้นฐาน	50	เมตร/วินาที
กำลังแบกทานที่ปลอดภัยของดิน	10	ตัน/ม.^{2}

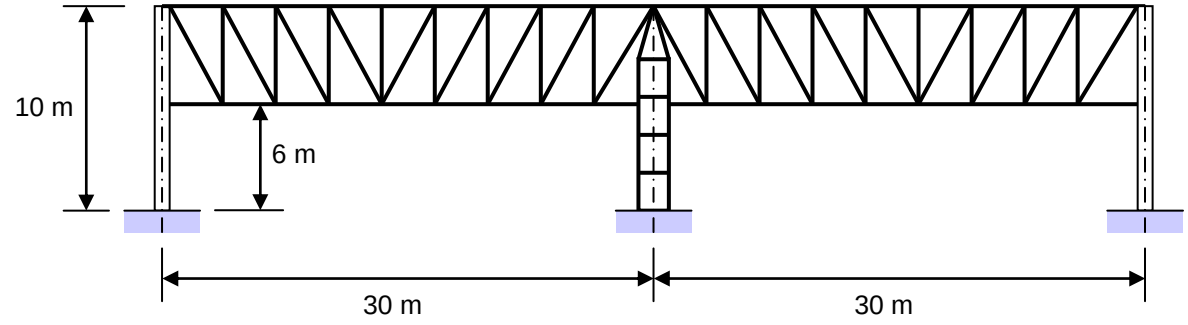
มาตรฐานที่ใช้ AISC 1989 ASD Method



รูปที่ 1 รูปแปลนโรงงาน

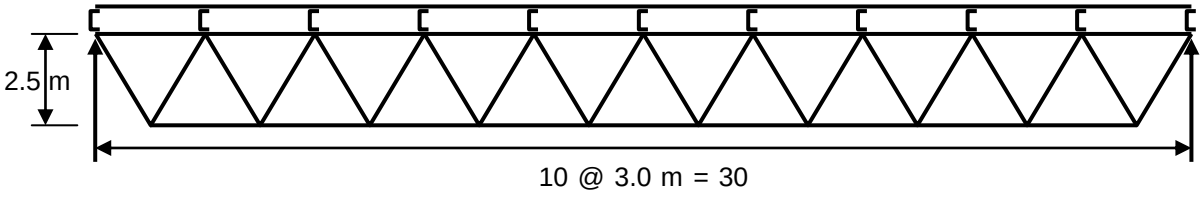


รูปที่ 2 Section A-A



รูปที่ 3 Section B-B

<u>Step 1:</u> ออกแบบโครงถักหลังคาย่อย (Secondary Roof Trusses) ช่วงยาว 30 เมตร



เนื่องจากความลาดเอียงน้อยกว่า 18^o ดังนั้นไม่คิดผลของแรงลม

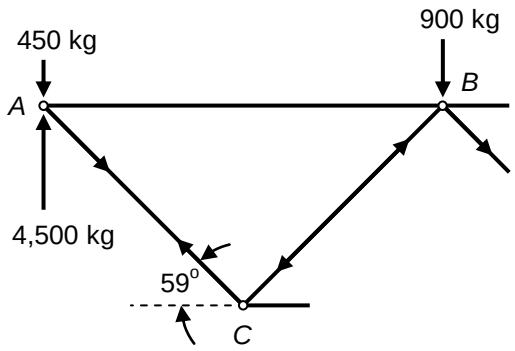
น้ำหนักบรรทุกจรลงโครงถัก = 50×6.0 = 300 ก.ก./ม.

น้ำหนักบรรทุกลงแป = 300×3.0 = 900 ก.ก./จุดภายใน

แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ R = 300×30/2 = 4,500 ก.ก.

<u>วิเคราะห์แรงในองค์อาคารโครงถัก:</u>

a) จุดรองรับ:



<u>ณ. จุด *A*:</u> F_{AC} = Max. internal tensile force

$F_{AC} \sin 59^o + 450 = 4{,}500$

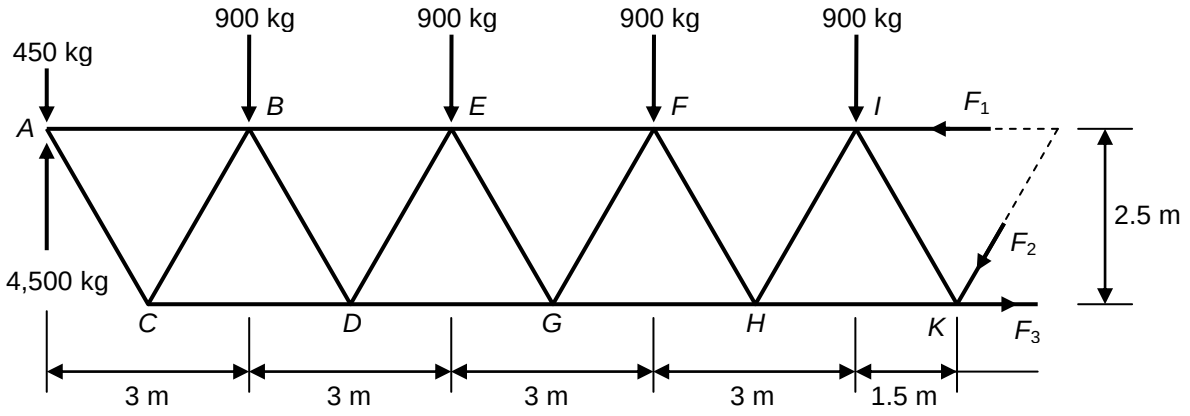
$\underline{F_{AC} = 4{,}725}$ ก.ก. (T)

<u>ณ. จุด *C*:</u> F_{BC} = Max. comp. force

$F_{AC} \sin 59^o = F_{BC} \sin 59^o$

$\underline{F_{BC} = 4{,}725}$ ก.ก. (C)

b) กลางช่วงโครงถัก:



<u>คำนวณโมเมนต์รอบจุด *K* :</u>

F_1 (2.5) + 450 (13.5) + 900 (10.5 + 7.5 + 4.5 + 1.5) = 4,500 (13.5)

$\underline{F_1}$ = 13,230 ก.ก. (C)

<u>คำนวณโมเมนต์รอบจุด *C* :</u>

13,230 (2.5) + 450 (1.5) = 4,500 (1.5) + 900 (1.5 + 4.5 + 7.5 + 10.5) + F_2 sin 59^o (12)

$\underline{F_2}$ = 525 ก.ก. (C)

<u>คำนวณโมเมนต์รอบจุด *A* :</u>

F_3 (2.5) = 900 (3 + 6 + 9 + 12) + 525 sin 59^o (15)

$\underline{F_3}$ = 13,500 ก.ก. (T)

<u>ตรวจสอบ :</u>

[$\Sigma F_y = 0$] 4,500 – 450 – 4(900) – 525 sin 59^o = -0.0128 ≈ 0 **OK**

[$\Sigma F_x = 0$] 13,500 – 13,230 – 525 cos 59^o = -0.395 ≈ 0 **OK**

<u>ออกแบบองค์อาคาร :</u>

<u>จันทัน :</u> แรงอัดมากที่สุด = 13.23 ตัน ความยาว 3.0 เมตร

ลองใช้หน้าตัดกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส □ 100 × 100 × 3.2 ม.ม., A = 33.6 ซม.^{2}, r = 5.84 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด L/r = 300/5.84 = 51.37 < 200 **OK**

แรงอัดที่ยอมให้จากตาราง ข.4 = 16.0 > 13.23 ตัน **OK**

ขื่อ : แรงดึงมากที่สุด = 13.5 ตัน ความยาว 3.0 เมตร

ลองใช้หน้าตัดกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส □ 100 × 100 × 3.2 ม.ม., A = 33.6 ซม.^{2}, r = 5.84 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด L/r = 300/5.84 = 51.37 < 300 **OK**

แรงดึงที่ยอมให้ = 0.6(2.5)(33.6) = 50.4 > 13.5 ตัน **OK**

ท่อนทแยง *BC* : แรงอัดมากที่สุด = 4.73 ตัน ความยาว 2.92 เมตร

ลองใช้หน้าตัดกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส □ 75 × 75 × 3.2 ม.ม., A = 8.93 ซม.^{2}, r = 2.91 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด L/r = 300/2.91 = 103 < 200 **OK**

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้จากตาราง ข.1 = 894 ก.ก./ซม.^{2}

แรงอัดที่ยอมให้ = 0.894(8.93) = 7.98 > 4.73 ตัน **OK**

ท่อนทแยง *AC* : แรงดึงมากที่สุด = 4.73 ตัน ความยาว 2.92 เมตร

ลองใช้หน้าตัดกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส □ 75 × 75 × 3.2 ม.ม., A = 8.93 ซม.^{2}, r = 2.91 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด L/r = 300/2.91 = 103 < 300 **OK**

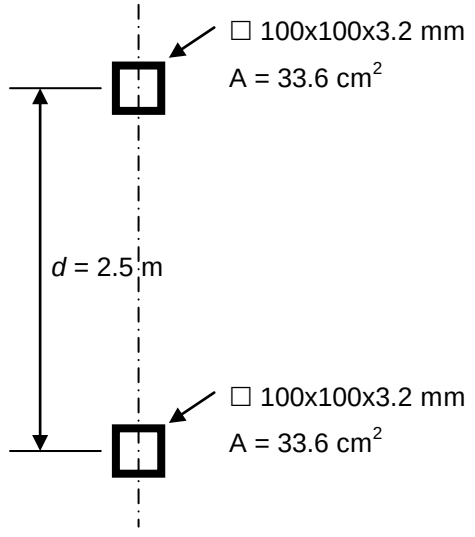
แรงอัดที่ยอมให้ = 0.6(2.5)(8.93) = 13.4 > 4.73 ตัน **OK**

สรุปองค์อาคารในโครงถักย่อย :

ท่อนจันทันและขื่อ : □ 100 × 100 × 3.2 ม.ม.

ท่อนทแยง : □ 75 × 75 × 3.2 ม.ม.

ตรวจสอบการแอ่นตัวกลางช่วงความยาว : (ใช้วิธีประมาณ)



$$I_{\text{approx}} = \frac{A_f \times d^2}{2}$$

A_f = พื้นที่หน้าตัด, d = ความลึกโครงถัก

I = 33.6(250)^2/2 = 1.05 × 10^6 ซม.^{4}

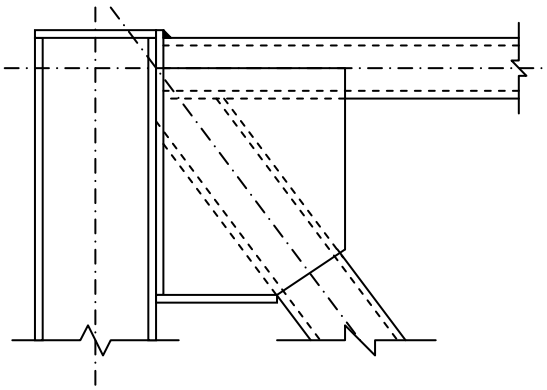
น้ำหนักบรรทุกจร = 300 ก.ก./ม.

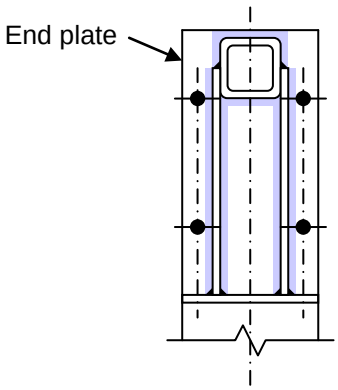
$$\Delta = \frac{5}{384} \times \frac{300/100 \times 3{,}000^4}{2.05\times10^6 \times 1.05\times10^6} = 1.47 \text{ ซม.}$$

ค่าที่ยอมให้ = 3,000/360 = 8.33 > 1.47 ซม. **OK**

โครงถักย่อย – จุดต่อ

ณ. จุดรองรับ *A* :





จำนวนสลักเกลียวที่ต้องการ :

แรงเฉือนที่จุดรองรับ = 4.5 ตัน

ลองใช้สลักเกลียว A307 ∅ 19 ม.ม. กำลังเฉือนเดี่ยว 1.99 ตัน/ตัว

จำนวนสลักเกลียวที่ต้องการ = 4.5/1.99 = 2.26 ตัว **ใช้ 4 ตัว**

แรงเฉือนที่สลักเกลียวรับได้ = 4(1.99) = 7.96 > 4.5 ตัน **OK**

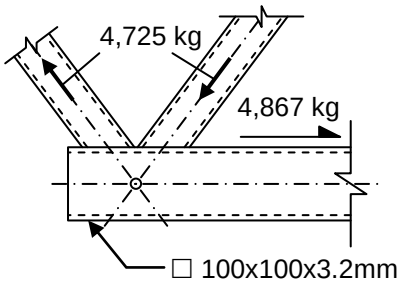
รอยเชื่อมแบบฟิลเลต :

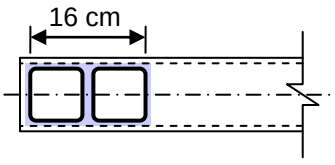
จากรูปตัดของจุดต่อความยาวรอยเชื่อม ≈ 100 ซม.

ลองใช้รอยเชื่อม E60 ขนาด 6 ม.ม. กำลังเฉือน 530 ก.ก./ซม.

ความยาวรอยเชื่อมที่ต้องการ = 4,500/530 = 8.46 >> 100 ซม. **OK**

จุดต่อภายในแบบ '*K*' ณ. จุดต่อ *C* :





ความยาวรอยเชื่อมจากรูป = 2(16) + 3(7.5)

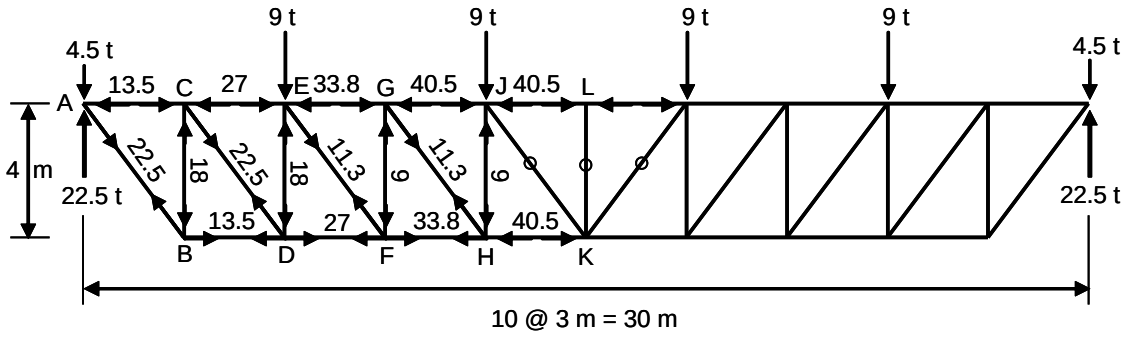
= 54.5 ซม.

ลองใช้รอยเชื่อม E60 ขนาด 6 ม.ม. กำลังเฉือน 530 ก.ก./ซม.

ความยาวรอยเชื่อมที่ต้องการ = 4,867/530

= 9.2 ซม. < 54.5 ซม. **OK**

<u>Step 2 :</u> ออกแบบโครงถักหลังคาหลัก (Primary Roof Trusses) ช่วงยาว 30 เมตร



แรงปฏิกิริยาจากโครงถักย่อย (2 ข้าง) = 2(4,500) = 9,000 ก.ก.

แรงปฏิกิริยาโครงถักหลัก = (4×9,000+2×4,500)/2 = 22,500 ก.ก.

คำนวณแรงในองค์อาคารดังแสดงในรูป โดยใช้สมดุลของแรงที่จุดต่อ

<u>ออกแบบองค์อาคาร :</u>

<u>จันทัน :</u> แรงอัดมากที่สุด = 40.5 ตัน ความยาว 3.0 เมตร

ลองใช้หน้าตัด WF 200 × 49.9, A = 63.53 ซม.^{2}, r_y = 5.02 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด L/r = 300/5.02 = 59.8 < 200 **OK**

แรงอัดที่ยอมให้จากตาราง ข.4 = 77 > 40.5 ตัน **OK**

<u>ขื่อ :</u> แรงดึงมากที่สุด = 40.5 ตัน ความยาว 3.0 เมตร

ลองใช้หน้าตัด WF 200 × 49.9, A = 63.53 ซม.^{2}, r_y = 5.02 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด L/r = 300/5.02 = 59.8 < 300 **OK**

แรงดึงที่ยอมให้ = 0.6(2.5)(63.53) = 95.3 > 40.5 ตัน **OK**

<u>ท่อนดิ่ง :</u> แรงอัดมากที่สุด = 18 ตัน ความยาว 4.0 เมตร

ลองใช้หน้าตัด WF 200 × 30.6, A = 39.01 ซม.^{2}, r_y = 3.61 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด L/r = 400/3.61 = 111 < 200 **OK**

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้จากตาราง ข.1 = 822.7 ก.ก./ซม.^{2}

แรงอัดที่ยอมให้ = 0.823(39.01) = 32 > 18 ตัน **OK**

<u>ท่อนทแยง :</u> แรงดึงมากที่สุด = 22.5 ตัน ความยาว 5.0 เมตร

ลองใช้หน้าตัด WF 200 × 30.6, A = 39.01 ซม.^{2}, r_y = 3.61 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด L/r = 500/3.61 = 139 < 300 **OK**

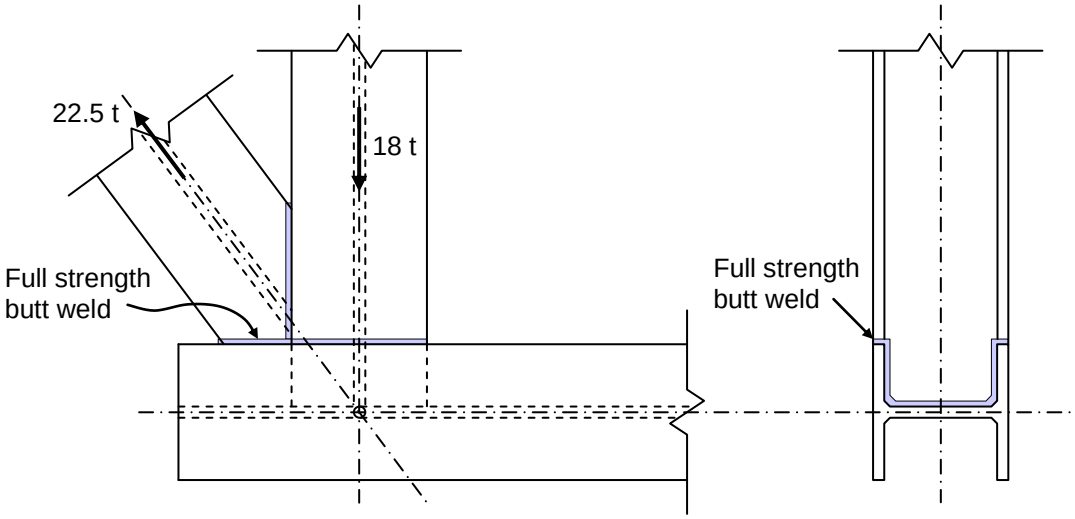
แรงอัดที่ยอมให้ = 0.6(2.5)(39.01) = 58.5 > 22.5 ตัน **OK**

<u>สรุปองค์อาคารในโครงถักย่อย :</u>

ท่อนจันทันและขื่อ : WF 200 × 49.9 ก.ก./ม.

ท่อนทแยง : WF 200 × 30.6 ก.ก./ม.

<u>จุดต่อทั่วไป (B)</u>



<u>ตรวจสอบท่อนทแยง (รับแรงดึง)</u>

ความยาวรอยเชื่อมจากรูป ≈ 50 ซม.

ลองใช้รอยเชื่อม E60 ขนาด 6 ม.ม. กำลังเฉือน 530 ก.ก./ซม.

ความยาวรอยเชื่อมที่ต้องการ = 22,500/530 = 42.5 > 50 ซม. **OK**

<u>ตรวจสอบการแอ่นตัวกลางช่วงความยาว :</u> (ใช้วิธีประมาณ)

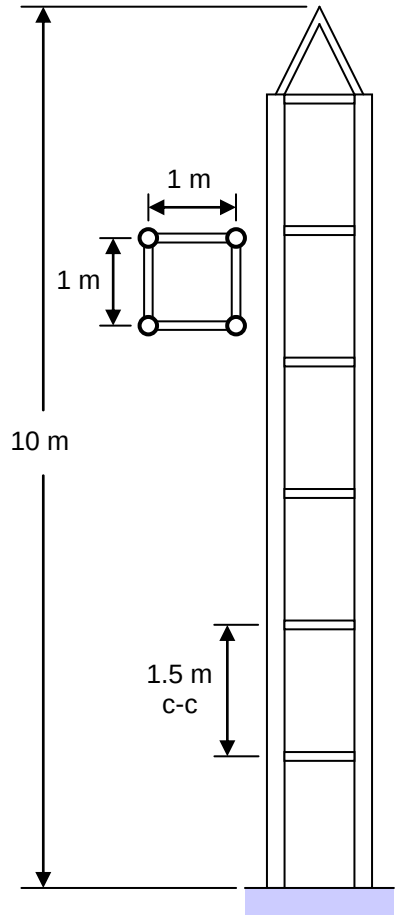
I = 63.53 $(400)^2$ / 2 = 5.08×10^6 ซม.^{4}

น้ำหนักแผ่เฉลี่ย = 4 (9,000) / 30 = 1,200 ก.ก./ม.

$$\Delta = \frac{5}{384}\times\frac{1,200/100\times3,000^4}{2.05\times10^6\times5.08\times10^6} = 1.22 \text{ ซม.}$$

ค่าที่ยอมให้ = 3,000/360 = 8.33 > 1.22 ซม. **OK**

<u>Step 3 :</u> A) ออกแบบเสากลาง (Central Column)



น้ำหนักบรรทุกจากโครงถักหลัก = 2 (22.5) = 45 ตัน

ลองใช้ท่อกลม 4 ∅ 114.3 ม.ม. หนา 4.5 ม.ม.

พื้นที่ / ท่อน = 15.52 ซม.^{2}

I / ท่อน = 234 ซม.^{4}

r / ท่อน = 3.89 ซม.

<u>คุณสมบัติหน้าตัดประกอบ :-</u>

$I_x = I_y = 4\,(\,234 + 15.52 \times 50^2\,)$

$= 1.56 \times 10^5$ ซม.^{4}

$A = 4\,(15.52) = 62.1$ ซม.^{2}

$r = \sqrt{1.56\times10^5 / 62.1} = 50.1$ ซม.

โคนเสายึดแน่น ยอดเสาเป็นปลายอิสระ (Fix-Free) KL = 2.0 (1,000) = 2,000 ซม.

อัตราส่วนความชะลูด KL/r = 2,000/50.1 = 40

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ จากตาราง ข.1 = 1,337 ก.ก./ซม.^{2}

แรงอัดที่รับได้ = 1.337(62.1) = 83 > 45 ตัน **OK**

<u>การโก่งเดาะของแต่ละท่อน :</u>

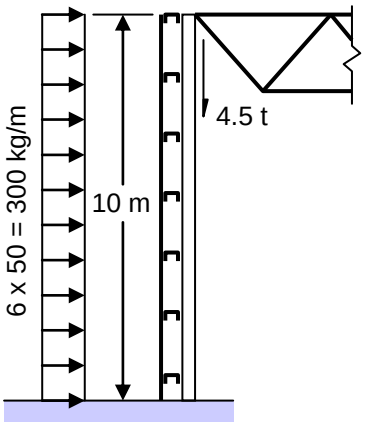
แรงอัด / ท่อน = 45/4 = 11.25 ตัน

อัตราส่วนความชะลูด = 150/3.89 = 39

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ จากตาราง ข.1 = 1,343 ก.ก./ซม.^{2}

แรงอัดที่รับได้ = 1.343(15.52) = 20.8 > 11.25 ตัน **OK**

B) เสารองรับโครงถักย่อย



แรงลม ณ ความสูงไม่เกิน 10 ม. = 50 ก.ก./ม.^{2}

ระยะห่างเสา 6 ม. แรงลม = 6(50) = 300 ก.ก./ม.

โมเมนต์ดัดกลางเสา = $300\times10^2/8$ = 3,750 ก.ก.-ม.

แรงอัดตามแนวแกน = 4.5 ตัน

สมมุติหน่วยแรงอัด = 1,000 ก.ก./ซม.^{2}

พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการ = 4,500/1,000 = 4.5 ซม.^{2}

ลองใช้หน้าตัด WF 200 × 49.9, A = 63.53 ซม.^{2}, S_x = 472 ซม.^{3} r_x = 8.62 ซม.
(แกน y ถูกยึดรั้งโดยผนัง)

f_a = 4,500/63.53 = 70.8 ก.ก./ซม.^{2}

L/r = 1,000/8.62 = 116

F_a = 776.5 ก.ก./ซม.^{2}

f_a/F_a = 70.8/776.5 = 0.0912 < 0.15

f_b = 3,750(100)/472 = 795 ก.ก./ซม.^{2}

เนื่องจากเป็นเสาขอบอาคาร มีผนังช่วยรองรับด้านข้าง F_b = 0.66(2,500) = 1,650 ก.ก./ซม.^{2}

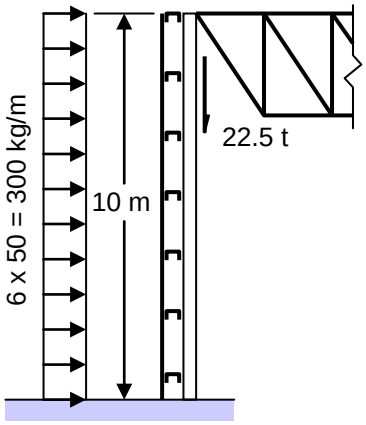
$$F'_{ex} = \frac{12\pi^2(2.05\times10^6)}{23\times116^2} = 784.5 \text{ ก.ก./ซม.}^2$$

$$\frac{C_m}{1-f_a/F'_{ex}} = \frac{1.0}{1-70.8/784.5} = 1.10 > 1.00 \quad \textbf{OK}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m f_b}{(1-f_a/F'_{ex})F_b} = \frac{70.8}{776.5} + \frac{1.10(795)}{1,650} = 0.621 < 1.0 \quad \textbf{OK}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{70.8}{776.5} + \frac{795}{1,650} = 0.573 < 1.0 \quad \textbf{OK}$$

C) เสารองรับโครงถักหลัก



แรงลม ณ ความสูงไม่เกิน 10 ม. = 50 ก.ก./ม.^{2}

ระยะห่างเสา 6 ม. แรงลม = 6(50) = 300 ก.ก./ม.

โมเมนต์ดัดกลางเสา = $300\times10^2/8$ = 3,750 ก.ก.-ม.

แรงอัดตามแนวแกน = 22.5 ตัน

สมมุติหน่วยแรงอัด = 1,000 ก.ก./ซม.^{2}

พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการ = 22,500/1,000 = 22.5 ซม.^{2}

ลองใช้หน้าตัด WF 250 × 72.4, A = 92.18 ซม.^{2}, S_x = 867 ซม.^{3} r_x = 10.8 ซม.
(แกน y ถูกยึดรั้งโดยผนัง)

f_a = 22,500/92.18 = 244 ก.ก./ซม.^{2}

L/r = 1,000/10.8 = 93

F_a = 977.5 ก.ก./ซม.^{2}

f_a/F_a = 244/977.5 = 0.25 > 0.15

f_b = 3,750(100)/867 = 433 ก.ก./ซม.^{2}

เนื่องจากเป็นเสาขอบอาคาร มีผนังช่วยรองรับด้านข้าง F_b = 0.66(2,500) = 1,650 ก.ก./ซม.^{2}

$$F'_{ex} = \frac{12\pi^2(2.05\times10^6)}{23\times93^2} = 1{,}221 \text{ ก.ก./ซม.}^2$$

$$\frac{C_m}{1-f_a/F'_{ex}} = \frac{1.0}{1-244/1{,}221} = 1.25 > 1.00 \quad \textbf{OK}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m f_b}{(1-f_a/F'_{ex})F_b} = \frac{244}{977.5} + \frac{1.25(433)}{1{,}650} = 0.578 < 1.0 \quad \textbf{OK}$$

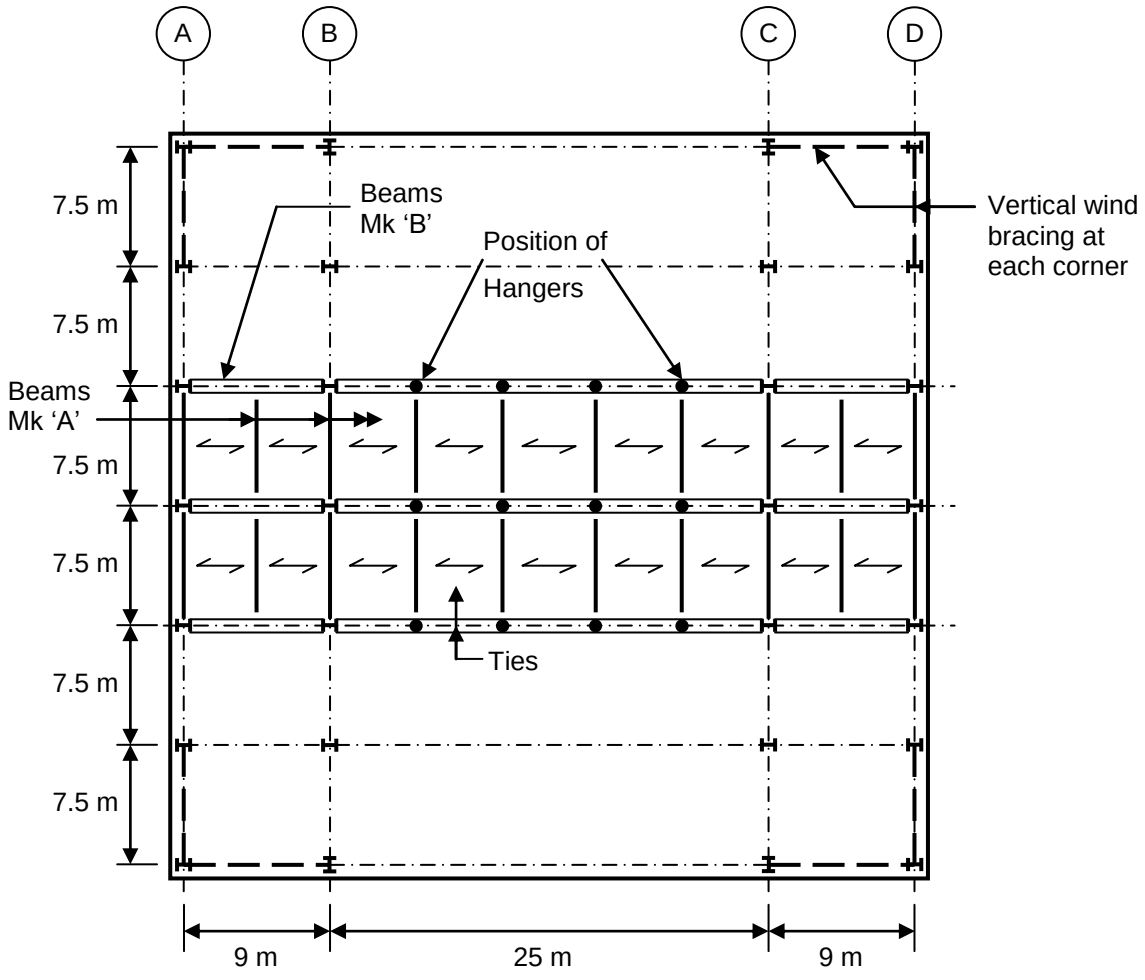
$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{244}{1{,}500} + \frac{433}{1{,}650} = 0.425 < 1.0 \quad \textbf{OK}$$

3. อาคารสำนักงาน

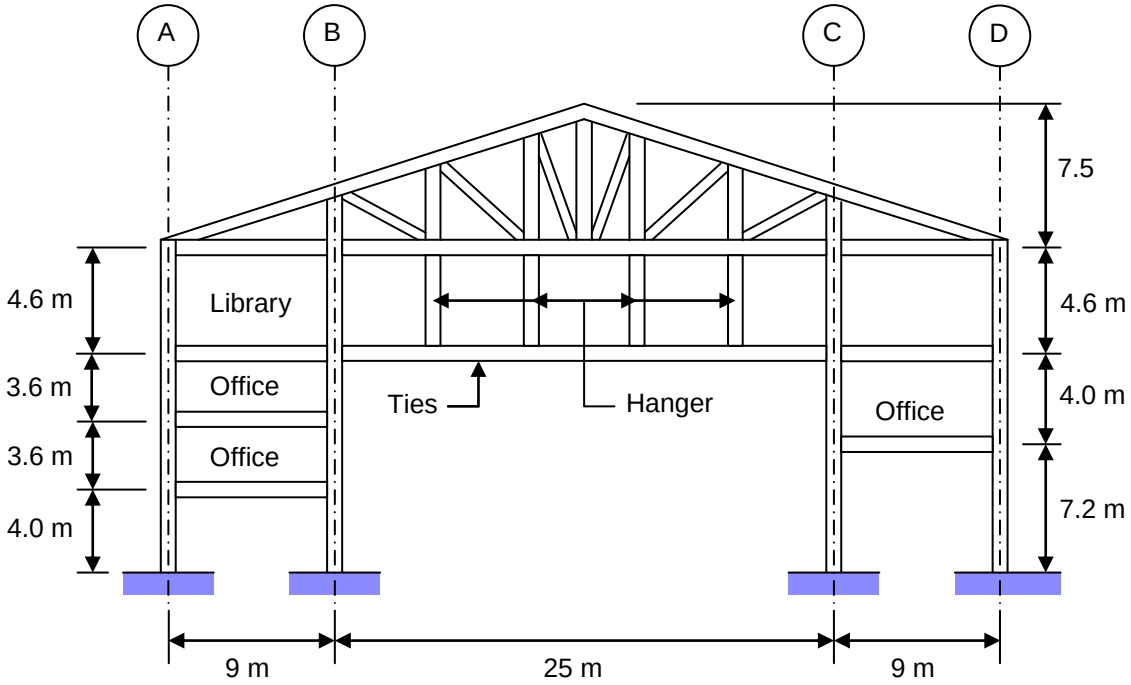
เป็นอาคารหลายชั้นขนาดใหญ่เช่น หอสมุด อาคารแสดงสินค้า หรือสำนักงานออฟฟิศ มีรูปหน้าตัดและแปลนดังแสดงในรูป อาคารชั้นบนซึ่งเป็นห้องสมุดจะถูกแขวนกับโครงถักหลังคา และเป็นเพดานของโถงกลางซึ่งเป็นช่วงเปิดยาวถึง 25 ม. ซึ่งถ้าใช้คานธรรมดารองรับชั้นห้องสมุดจะต้องใช้คานขนาดใหญ่มากหรือคานประกอบ

น้ำหนักบรรทุกจร:

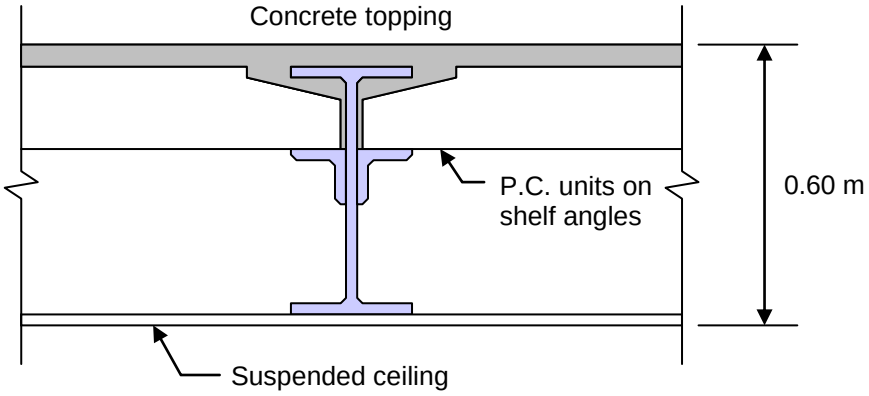
พื้นห้องสมุด	600	ก.ก./ม.^{2}
พื้นห้องเครื่องใต้หลังคา	500	ก.ก./ม.^{2} (กริด B $\rightarrow$ C)
พื้นสำนักงาน	400	ก.ก./ม.^{2}
หลังคา	50	ก.ก./ม.^{2}



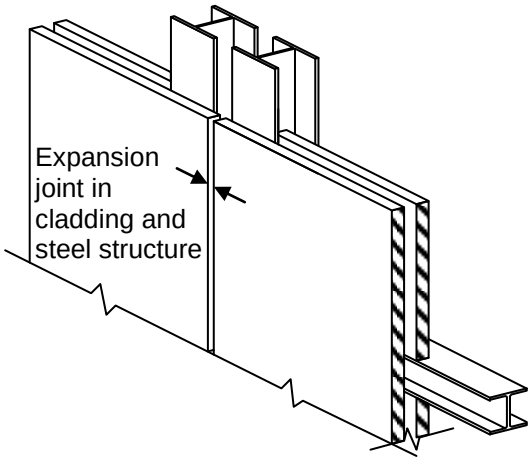
รูปแปลนที่ระดับห้องสมุด



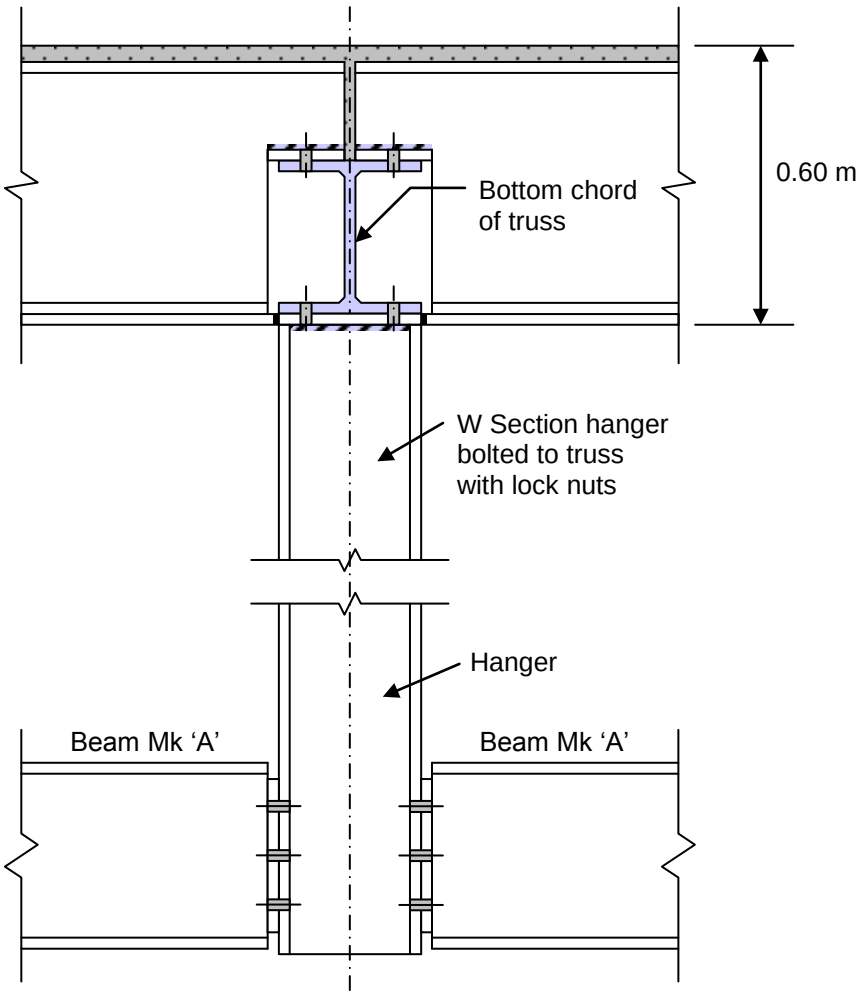
รูปตัดอาคารช่วงห้องสมุด



รายละเอียดจุดต่อคาน – พื้น



รายละเอียดจุดต่อขยายตัว



รายละเอียดจุดต่อแขวน

<u>น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบ :-</u>

พื้นสำเร็จรูป Hollow Core HC.150 + ผิวพื้นทับหน้า	=	380	ก.ก./ม.^{2}
พื้นห้องสมุด = 380 + 600	=	980	ก.ก./ม.^{2}
พื้นห้องเครื่องใต้หลังคา = 380 + 500	=	880	ก.ก./ม.^{2}
พื้นสำนักงาน = 380 + 400	=	780	ก.ก./ม.^{2}
หลังคา = 50(ประมาณ) + 50	=	100	ก.ก./ม.^{2}

<u>Beam Mk 'A'</u> ช่วงคานยาว 7.5 เมตร มีการรองรับด้านข้างเต็มที่

ระยะห่างระหว่างคาน	=	5.0	เมตร
น้ำหนักแผ่ลงคาน = 980 × 5	=	4,900	ก.ก./เมตร
โมเมนต์ดัด $M_{max} = 4.9 \times 7.5^2 / 8$	=	34.5	ตัน-เมตร

แรงเฉือน V_{max} = 4.9 × 7.5 / 2 = 18.4 ตัน

โมดูลัสหน้าตัดที่ต้องการ = 34.5(100)/(0.66×2.5) = 2,091 ซม.^{3}

ลองใช้หน้าตัด W500×114 ก.ก./ม. (S_x = 2,500 ซม.^{2}) ความลึก 48.2 ซม. < 60 ซม.

หน่วยแรงเฉือน f_v = 18.4(1,000)/(45.2×1.1) = 370 ก.ก./ซม.^{2}

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ = 0.4(2,500) = 1,000 > 370 ก.ก./ซม.^{2} **OK**

<u>ตรวจสอบการแอ่นตัว :</u>

น้ำหนักจรแผ่ลงคาน = 600 × 5 = 3,000 ก.ก./เมตร

ระยะแอ่นตัว $\Delta = \frac{5}{384} \times \frac{3,000/100 \times 750^4}{2.05 \times 10^6 \times 60,400}$ = 0.998 ซม.

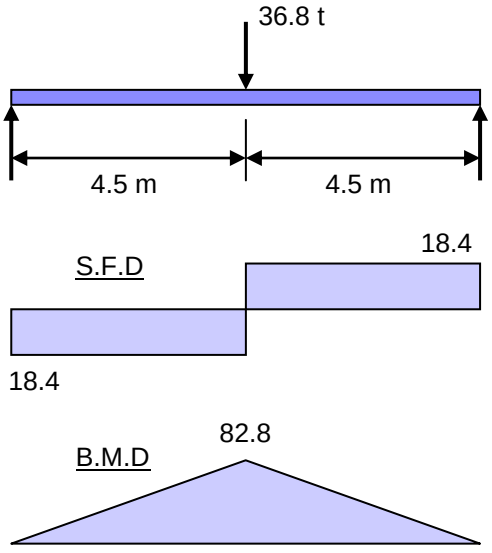
ระยะแอ่นตัวที่ยอมให้ = 750/360 = 2.08 ซม. **OK**

∴ **<u>เลือกใช้หน้าตัดสำหรับ Beam Mk. 'A' : W500 × 114 ก.ก./ม.</u>**

<u>Beam Mk 'B'</u> ช่วงคานยาว 9.0 เมตร มีการรองรับด้านข้างเต็มที่

ช่วงระหว่างเส้นกริด A ถึง B และ C ถึง D มีคาน 'A' มาพาดกลางช่วงที่ระยะ 4.5 ม. ทั้งสองข้าง

∴ แรงปฏิกิริยาจากคาน 'A' = 18.4 × 2 = 36.8 ตัน



M_{max} = PL/4 = 36.8 × 9 / 4 = 82.8 ตัน-ม.

V_{max} = 36.8 / 2 = 18.4 ตัน

ความยาวปราศจากการยึดรั้ง = 4.5 ม.

โมดูลัสหน้าตัดที่ต้องการ :

$S_{req'd}$ = 82.8(100)/1.5 = 5,520 ซม.^{2}

ลองใช้หน้าตัด W700×185 (S_x = 5,760 ซม.^{2})

L_c = 3.82 ม. < L < L_u = 5.80 ม.

∴ F_b = 0.6(2.5) = 1.5 ตัน/ซม.^{2} **As assumed**

หน่วยแรงเฉือน f_v = 18.4(1,000)/(65.2×1.3) = 217 ก.ก./ซม.^{2}

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ = 0.4(2,500) = 1,000 > 217 ก.ก./ซม.^{2} **OK**

<u>ตรวจสอบการแอ่นตัว :</u>

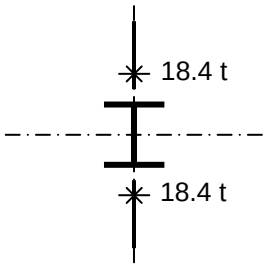
น้ำหนักจรจากคาน 'A' = $600 \times 5 \times 7.5$ = 22,500 ก.ก.

ระยะแอ่นตัว $\Delta = \frac{1}{48} \times \frac{22,500 \times 900^3}{2.05 \times 10^6 \times 137,000}$ = 1.22 ซม.

ระยะแอ่นตัวที่ยอมให้ = 900/360 = 2.50 ซม. **OK**

∴ <u>เลือกใช้หน้าตัดสำหรับ Beam Mk. 'B' : W700 × 185 ก.ก./ม.</u>

<u>ออกแบบเสาแขวน Hangers</u> รองรับโดยขื่อของโครงถัก



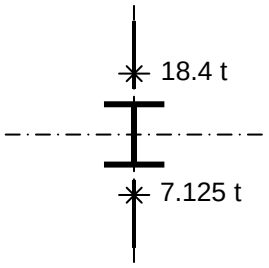
<u>กรณีบรรทุก 1 :</u> (น้ำหนักจรเต็มทั้งสองด้าน) คาน 'A'

แรงดึงทั้งหมด = 2 × 18.4 = 36.8 ตัน

พื้นที่ต้องการ = 36.8/(0.6×2.5) = 24.5 ซม.^{2}

ลองหน้าตัด W150×31.5 (A = 40.14 ซม.^{2})

แรงดึงที่ยอมให้ = 0.60 (2.5) (40.14) = 60.2 > 36.8 ตัน **OK**



<u>กรณีบรรทุก 2 :</u> (น้ำหนักจรด้านเดียว) คาน 'A'

แรงดึงทั้งหมด = 18.4 + 7.125 = 25.5 ตัน

ระยะเยื้องศูนย์ = D/2 + 10 = 15/2 + 10 = 17.5 ซม.^{2}

โมเมนต์ M_x = (36.8 – 25.5) × 17.5 = 198 ตัน-ซม.

หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ = 0.6(2.5) = 1.50 ตัน/ซม.^{2}

หน่วยแรงดึงร่วมกระทำ $P/A + M/S$ = 22.5/40.14 + 198/219 = 1.47 < 1.50 ตัน/ซม.^{2} **OK**

∴ <u>เลือกใช้หน้าตัดสำหรับ Hangers : W150 × 31.5 ก.ก./ม.</u>

<u>ออกแบบ Main Truss</u> : ช่วงยาว = 25 เมตร, ระยะห่างระหว่างโครง = 7.5 เมตร

<u>a) น้ำหนักบรรทุกบนจันทัน :</u>

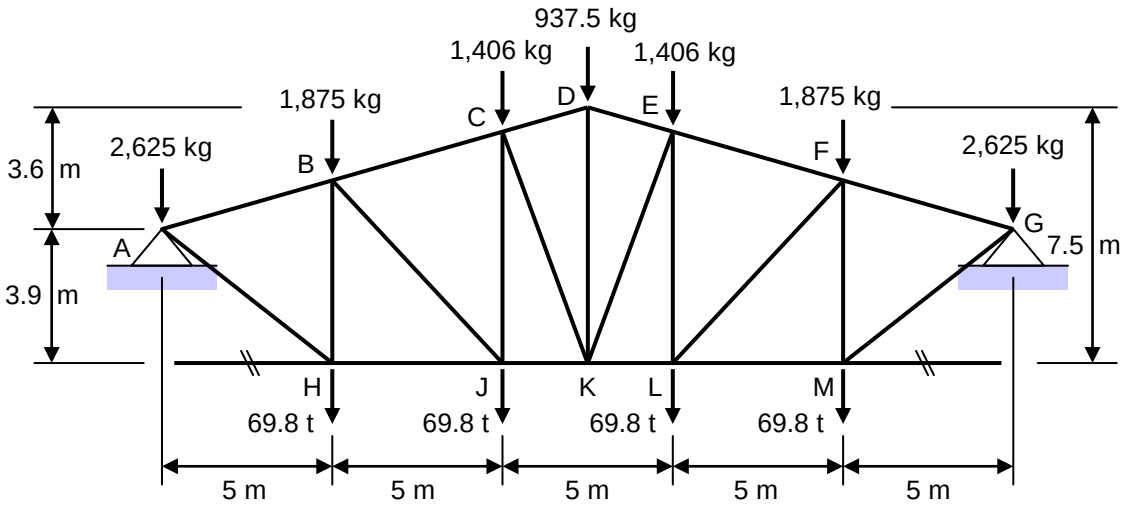
<u>ณ. จุด B และ F :</u> รับน้ำหนัก = $50 \times 7.5 \times 5$ = 1,875 ก.ก.

<u>ณ. จุด A และ G :</u> รับน้ำหนัก = 1/2 ของน้ำหนักหลังคา + แรงปฏิกิริยาจากคานเอียงใต้หลังคาระหว่างกริด A – B และ C – D

น้ำหนักบรรทุก = 50 × 7.5 × 5 / 2 + 0.5 (50 × 9 × 7.5) = 2,625 ก.ก.

ณ. จุด D : น้ำหนักบรรทุก = 50 × 7.5 × 2.5 = 937.5 ก.ก.

ณ. จุด C และ E : รับน้ำหนัก = 50 × 7.5 × (5 + 2.5) / 2 = 1,406 ก.ก.



b) น้ำหนักบรรทุกแขวนขื่อ : (H, J, L และ M)

น้ำหนักบรรทุกจากเสาแขวน (max.) = 36.8 ตัน

แรงปฏิกิริยาจากคานรับพื้นห้องเครื่องใต้หลังคา :

น้ำหนักบรรทุก = 2 × (1/2) (880 × 5 × 7.5) / 1,000 = 33 ตัน

รวมทั้งหมด = 69.8 ตัน

แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ R_A และ R_G :

$$R_A = R_G = (1/2)\,(2\times2.625 + 2\times1.875 + 2\times1.406 + 0.9375 + 4\times69.8)$$

$$= \mathbf{146 \text{ ตัน}}$$

วิเคราะห์หาแรงในองค์อาคารโครงถักโดยเริ่มจากการตัดโครงระหว่างจุด C-D และ J-K ดังในรูปข้างล่าง

a) คำนวณโมเมนต์รอบจุด C :

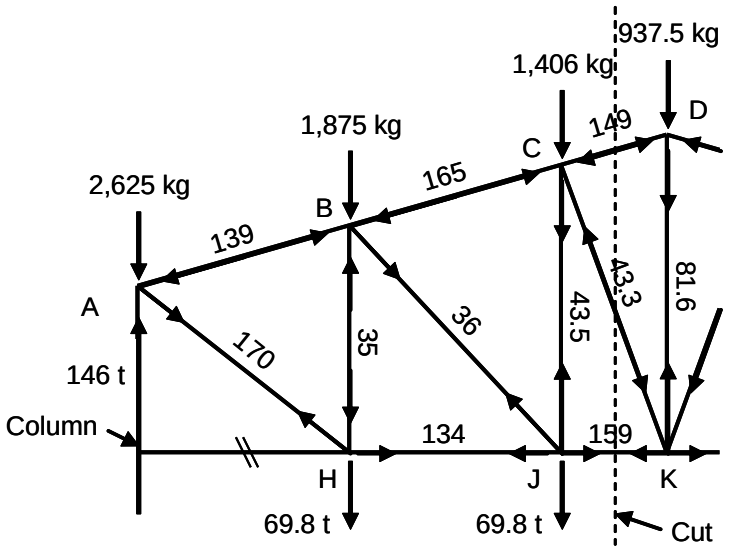
$$146 \times 10 = 2.625 \times 10 + 1.875 \times 5 + 69.8 \times 5 + F_{JK} \times 6.78$$

$$\therefore \mathbf{F_{JK} = 159 \text{ ตัน (แรงดึง)}}$$

b) คำนวณโมเมนต์รอบจุด A :

$$159 \times 3.9 + F_{CK}\,(10\times6.78/7.23 + 2.88\times2.5/7.23) = 1.875 \times 5 + 69.8 \times 5 + 1.406 \times 10 + 69.8 \times 10$$

$$\therefore \mathbf{F_{CK} = 43.3 \text{ ตัน (แรงอัด)}}$$



c) คำนวณโมเมนต์รอบจุด J :

$$F_{CD}\,(6.78 \times 2.5 / 2.6) + 43.3 \times 6.78 \times 2.5 / 7.23 + 1.875 \times 5 + 69.8 \times 5 + 2.625 \times 10 = 146 \times 10$$

$$\therefore \quad \mathbf{F_{CD} = 149 \text{ ตัน (แรงอัด)}}$$

ออกแบบองค์อาคารโครงถัก :

a) จันทัน (Top chord) : องค์อาคารวิกฤต = BC : F_{BC} = 165 ตัน (แรงอัด) : ความยาว = 5.2 ม.

ลองใช้หน้าตัด W350 × 115 (A=146 ซม.^{2}, r_y = 8.78 ซม.)

อัตราส่วนความชะลูด = 520 / 8.78	=	59 < 200	**OK**
หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ จากตาราง ข.1	=	1,225 ก.ก./ซม.^{2}	
แรงอัดที่รับได้ = 1.225(146)	=	179 > 165 ตัน	**OK**

b) ขื่อ (Bottom chord) : องค์อาคารวิกฤต = JK : F_{JK} = 159 ตัน (แรงดึง) : ความยาว = 2.5 ม.

ลองใช้หน้าตัด W350 × 106 (A=135.3 ซม.^{2}, r_y = 8.33 ซม.)

อัตราส่วนความชะลูด = 250 / 8.33	=	30 < 300	**OK**
แรงดึงที่รับได้ = 0.6 (2.5) (135.3)	=	203 > 159 ตัน	**OK**

c) ท่อนทแยง (Diagonals) : องค์อาคารดึงวิกฤต = AH : F_{AH} = 170 ตัน (แรงดึง) : ความยาว = 6.34 ม.

ลองใช้หน้าตัด W350 × 106 (A=135.3 ซม.^{2}, r_y = 8.33 ซม.)

อัตราส่วนความชะลูด = 634 / 8.33	=	76 < 300	**OK**

แรงดึงที่รับได้ = 0.6 (2.5) (135.3) = 203 > 170 ตัน **OK**

<u>องค์อาคารอัดวิกฤต</u> = CK : F_{CK} = 43.3 ตัน (แรงอัด) : ความยาว = 7.23 ม. ใช้หน้าตัดเดิม

อัตราส่วนความชะลูด = 723 / 8.33 = 87 < 200 **OK**

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ จากตาราง ข.1 = 1,025 ก.ก./ซม.^{2}

แรงอัดที่รับได้ = 1.025(135.3) = 139 > 43.3 ตัน **OK**

d) <u>ท่อนดิ่ง (Verticals)</u> : องค์อาคารดึงวิกฤต = DK : F_{DK} = 81.6 ตัน (แรงดึง) : ความยาว = 7.5 ม.

<u>ลองใช้หน้าตัด W250 × 64.4</u> (A=82.06 ซม.^{2}, r_y = 5.98 ซม.)

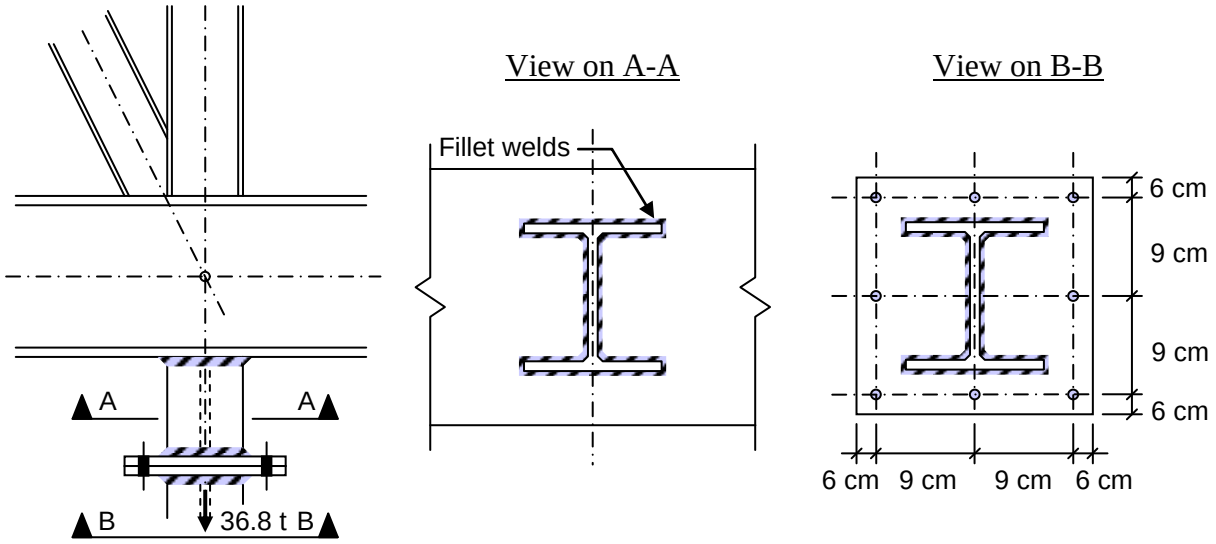
อัตราส่วนความชะลูด = 750 / 5.98 = 125 < 300 **OK**

แรงดึงที่รับได้ = 0.6 (2.5) (82.06) = 123 > 81.6 ตัน **OK**

<u>สรุปหน้าตัดที่ใช้ในโครงถัก</u> :-

จันทัน	**:**	**W 350 × 115**
ขื่อ	**:**	**W 350 × 106**
ท่อนทแยง	**:**	**W 350 × 106**
ท่อนดิ่ง	**:**	**W 250 × 64.4**

<u>ออกแบบจุดต่อ</u> : จุดต่อในโครงอาคารระหว่างคานกับเสาและจุดต่อในโครงถักจะเหมือนกับในโครงสร้างทั่วไป ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะจุดต่อระหว่างเสาแขวนและโครงถัก



แรงดึงในเสาแขวน = 36.8 ตัน

<u>ตรวจสอบกำลังรอยเชื่อม</u> :- เสาแขวนหน้าตัด W150 × 31.5

ความยาวรอยเชื่อม = 2 × 15 + 4 × 6.35 + 2 × 11.2	=	77.8	ซม.	
กำลังรอยเชื่อม E60 ขนาด 8 ม.ม.	=	830	ก.ก./ซม.	
แรงดึงที่รอยเชื่อมรับได้ = 0.83 × 77.8	=	64.6	> 36.8 ก.ก.	**OK**

<u>ตรวจสอบกำลังสลักเกลียว</u> :- ระหว่างแผ่นเหล็กเสาแขวนและโครงถัก

ลองใช้สลักเกลียว A307 ∅ 22 ม.ม. (A=3.8 ซม.^{2}) จำนวน 8 ตัว

กำลังรับแรงดึง = 8 × 3.8 × 1.4	=	42.6	> 36.8 ก.ก.	**OK**

<u>ออกแบบเสาแนวเสากริด C</u> :

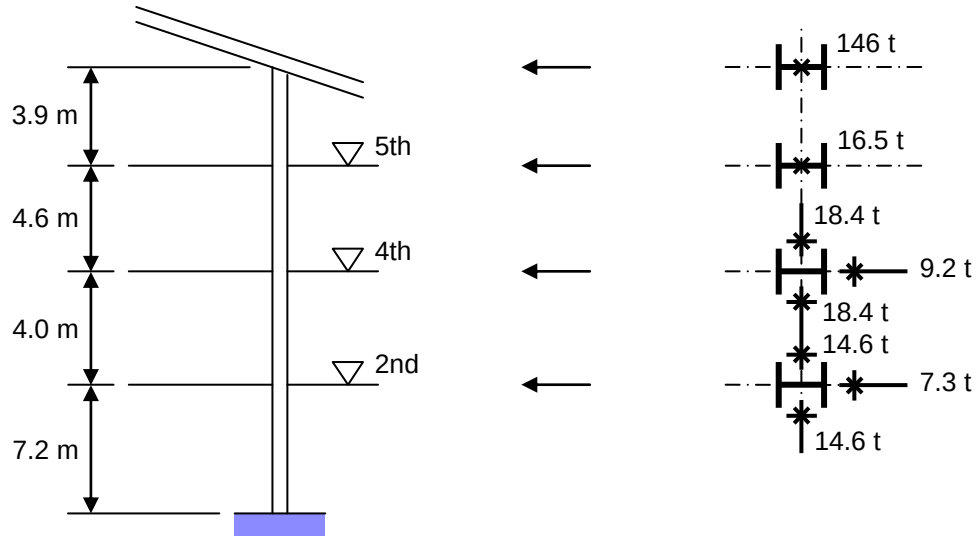
น้ำหนักจากโครงหลังคาที่ระดับหลังคา	=	146	ตัน
น้ำหนักจากคานพื้นห้องเครื่อง = (0.88×5×7.5)/2	=	16.5	ตัน

น้ำหนักจากคานชั้นสี่ (ห้องสมุด) :-

0.98×5×7.5/2	=	18.4	ตัน
18.4/2	=	9.2	ตัน

น้ำหนักจากคานชั้นสอง (สำนักงาน) :-

0.78×5×7.5/2	=	14.6	ตัน
14.6/2	=	7.3	ตัน



น้ำหนักบรรทุกรวมทั้งหมด = 146 + 16.5 + 2×18.4 + 9.2 + 2×14.6 + 7.3 = 245 ตัน

<u>ความยาวประสิทธิผล</u> : จากระดับพื้นชั้นล่างถึงชั้นสอง โคนเสาถูกยึดแน่นกับฐานราก

$L_e = 0.80L = 0.80 \times 7.2$ = 5.76 เมตร

ลองใช้หน้าตัด W400 × 168 ก.ก./ม. (A = 214.4 ซม.^{2}, r_y = 9.65 ซม.)

อัตราส่วนความชะลูด = 576 / 9.65 = 60 < 200 **OK**

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ จากตาราง ข.1 = 1,219 ก.ก./ซม.^{2}

แรงอัดที่รับได้ = 1.219 × 214.4 = 261 > 245 ตัน **OK**

∴ <u>สำหรับเสาบนเส้นกริด C ใช้หน้าตัด : W400 × 168 ก.ก./ม.</u>

<u>เสถียรภาพโดยรวมของอาคาร</u> : โดยใช้การยึดโยงที่มุมอาคารในแต่ละด้านของอาคาร ในที่นี้จะแสดงออกแบบหนึ่งด้าน กำหนดความเร็วลมพื้นฐาน 45 เมตร/วินาที

<u>คำนวณความดันลม q</u> : ตามมาตรฐาน ASCE 7-98

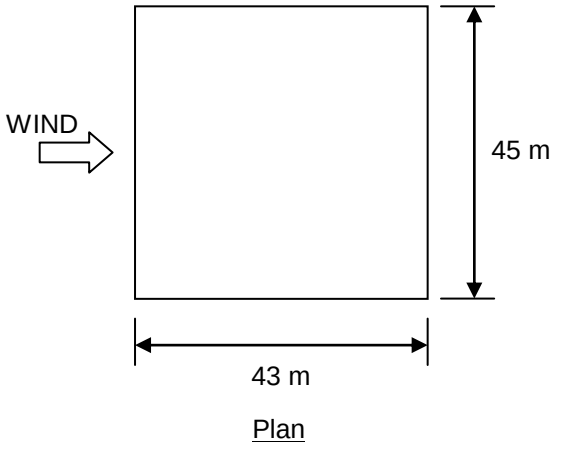
ความเร็วลมพื้นฐาน V = 45 × 3,600 / 1,000 = 162 ก.ม./ช.ม.

ความสูงอาคาร z = 7.2 + 4.0 + 4.6 + 3.9 = 19.7 เมตร

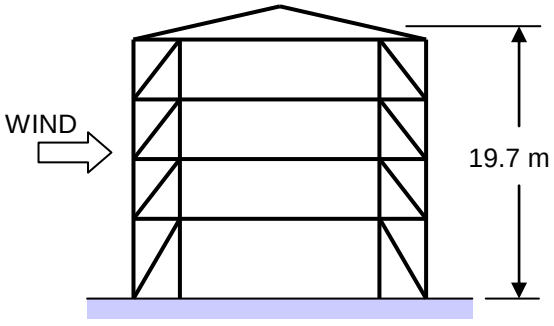
สำหรับภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง C : α = 9.5, z_g = 274 เมตร

ตัวคูณความสูง $K_z = 2.01 (19.7 / 274)^{2 / 9.5}$ = 1.16

ความดัน $q = 0.00483 \times 1.16 \times 162^2 / 1,000$ = 147 ก.ก./ตรม.



<u>Plan</u>

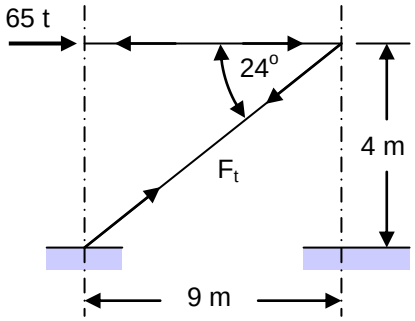


<u>Side</u>
Elevation

แรงลม = 147 × 45 × 19.7 / 1,000 = 130 ตัน

แรงบนชุดยึดโยงแต่ละชุด (มี 2 ชุด) = 130 / 2 = 65 ตัน

ออกแบบโดยวิธีง่ายโดยใช้คิดเป็นแรงเฉือน P ที่ชั้นหนึ่ง :



$F_t \cos 24^o = 65$ ตัน

$\therefore$ **$F_t = 71$ ตัน**

พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการ $= 71 / 1.5 = 47.3$ ซม.^{2}

ลองใช้หน้าตัด □ 200 × 200 × 8 ม.ม.

(A = 59.793 ซม.^{2}, r_y = 7.78 ซม.^{2})

อัตราส่วนความชะลูด $= \sqrt{400^2 + 900^2} / 7.78 = 126 < 300$ **OK**

แรงดึงที่รับได้ = 0.6 (2.5) (59.793) $= 90 > 71$ ตัน **OK**

$\therefore$ **<u>สำหรับองค์อาคารยึดโยง : □ 200 × 200 × 8 ม.ม.</u>**