



การศึกษาเปรียบเทียบน้ำหนักโครงสร้างหลังคาแบบ PEB และรูปแบบ Cellular Beam ของหลังคาจั่วโรงงานทั่วไปตามมาตรฐานการออกแบบแรงลม มยผ.1311-50

ณัฏ โขติกรวัฒน์^{1*} และทรงพล จารุวิศิษฐ์²

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*natach.cho@gmail.com, fengspc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบโครงสร้างหลังคาเหล็กโรงงานในรูปแบบ PEB และรูปแบบ Cellular Beam ตามมาตรฐานการออกแบบแรงลม มยผ.1311-50 โดยทำการเปรียบเทียบน้ำหนักของวัสดุเหล็กที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง RFEM โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาโรงงานขนาดตามยาว 60 เมตร มีระยะห่างช่วงเสา 6 เมตร ได้แก่ ความยาวของช่วงหลังคาที่ 20, 30, 40 และ 50 เมตร, องศาความลาดเอียงของหลังคาได้แก่ 5 และ 7.5 องศา, ความสูงเสา 9 เมตรและ 12 เมตร โดยอ้างอิงใช้ค่าความเร็วลมในการออกแบบตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน มยผ.1311-50 เท่ากับ 25 เมตร/วินาที และใช้วิธีการออกแบบเหล็กตามมาตรฐาน American Institute of Steel Construction (AISC) ด้วยวิธี Load & Resistance Factor Design (LRFD360-16) และตามกฎกระทรวง ปี 2566 จากผลการวิเคราะห์ออกแบบพบว่า โครงหลังคาทั้ง 2 รูปแบบ จะมีน้ำหนักเหล็กที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะของความยาวหลังคา ความสูงของเสา และความลาดชันของหลังคามีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักเหล็กระหว่างโครงสร้างรูปแบบ PEB และแบบ Cellular Beam พบว่าโครงหลังคาแบบ PEB ให้ค่าน้ำหนักโครงสร้างหลังคาเหล็กน้อยกว่ารูปแบบ Cellular Beam อยู่ประมาณ 5-40%

คำสำคัญ: อาคารเหล็ก แรงลม โรงงาน โครงหลังคาPEB โครงหลังคาCellular Beam

COMPARISON OF GABLE ROOF FACTORY STEEL WEIGHT BETWEEN PEB AND CELLULAR BEAM SYSTEM ACCORDING TO DPT 1311-50 WIND LOAD DESIGN STANDARD

Natach Chotikornwat¹ and Songpol Charuvisit²

Department of Civil engineering Kasetsart University

*natach.cho@gmail.com, fengspc@ku.ac.th

Abstract

This research studies the factory steel roof structures in the PEB and the Cellular Beam systems according to the DPT1311-50 wind resistance design standard by comparing weight of the steel structures obtained from the design. The commercial software named “RFEM” were used in the analysis and design of the roof structures. The parameters considered in this study comprise of the span length varied from 20, 30, 40 and 50 m., the roof slope of 5 and 7.5 degree and the column height of 9 and 12 m. under the design mean wind speed of 25 m/s. The steel members were designed using the Load & Resistance Factor Design (LRFD360-16) method of the American Institute of Steel Construction (AISC) standard and the ministerial regulation B. E. 2566 of Thailand. From the analysis and design results, it is found that the steel weight of the whole structure shall increase with the increasing of the span length, the column height and the roof slope for both roof systems. In all design cases, the PEB roof system is steel weight less than the cellular beam system for about 5-40%.

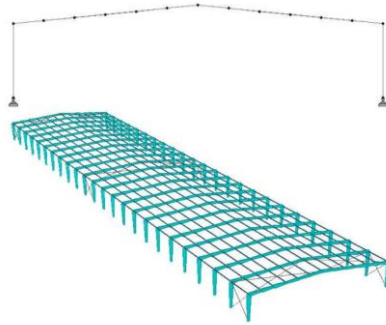
Keywords: Steel Building, Wind load, PEB, Cellular Beam, Warehouse

1. บทนำและงานวิจัยในอดีต

ระบบโครงสร้างหลังคาเหล็ก Pre Engineered steel Building (PEB) เป็นระบบโครงสร้างหลังคาที่ใช้เหล็กกำลังสูง ออกแบบขนาดหน้าตัดเหล็กแปรเปลี่ยนตามตำแหน่งของโครงสร้าง (ช่วงยาวของหลังคาและตามความสูงของเสา) ซึ่งออกแบบตามค่าแรงที่ได้จากผลการวิเคราะห์ มีระบบโครงสร้างที่ต้องการความกว้างภายในองค์อาคารที่มาก (ความยาวช่วง Span หลังคา) โดยสามารถลดระยะเวลาในการก่อสร้าง และสามารถออกแบบให้มีช่วงหลังคาได้ยาว ประหยัดต้นทุนกว่าระบบการก่อสร้างแบบดั้งเดิม (CSB) ที่เป็นโครงถักซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้เหล็กขนาดเท่ากันตลอดช่วงความยาวของหลังคา รวมไปถึงสามารถช่วยลดจำนวนแรงงานที่ต้องใช้และช่วยลดมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อมจากการก่อสร้างอีกด้วย โดยมีงานวิจัยในต่างประเทศจำนวนมากที่ทำการศึกษาระบบโครงสร้างหลังคา PEB [1-4] ซึ่งโดยปกติการออกแบบและประกอบในต่างประเทศนั้นจะมีข้อกำหนดและมาตรฐานเฉพาะของแต่ละประเทศ ทำให้ในประเทศไทยต้องทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและกรรมวิธีในการผลิต รวมไปถึงการออกแบบที่คำนึงถึงต้นทุนในการก่อสร้างให้สอดคล้องกับข้อกำหนด และมาตรฐานการออกแบบของประเทศไทย โดยในปัจจุบันการออกแบบโครงหลังคาภายใต้แรงลมจะอ้างอิงมาตรฐานในการคำนวณแรงลมของกรมโยธาธิการ หรือ มยพ.1311-50 [5]

จากงานวิจัยในอดีตที่นำเสนอ บุญเลิศ ขวัญยืน(2020) [6] ได้ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักของระบบโครงสร้างหลังคาโรงงานแบบ PEB กับระบบทั่วไป (CSB) ภายใต้การออกแบบรับแรงลมในประเทศไทย โดยการใช้โปรแกรม staad pro ทำการโมเดลและวิเคราะห์โครงข้อแข็งแบบ 2 มิติ โดยใช้ข้อกำหนดของ American standard steel design 1989 ซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของ Lateral Torsional Buckling สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การโมเดลแบบ 3 มิติโดยการคำนวณทั้ง 2 ทิศทางซึ่งให้ผลที่ละเอียดขึ้นมากกว่าแบบ 2 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมทั้งอาคารการตรวจสอบ Stability ต่างๆได้ครบถ้วนมากขึ้น รวมทั้ง

การออกแบบหน้าตัด Optimization โดยวิธี LRFD 360-16 [7] เพื่อมุ่งเน้นการออกแบบโครงหลังคาแต่ละแบบที่ประหยัดมากขึ้น



ภาพที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างหลังคาเหล็ก PEB

ที่มา : M.sai Deepka, K. P. K.,2018

ระบบโครงสร้างเหล็ก Cellular steel beams มีงานวิจัยที่ทำการศึกษา [8-10] เป็นระบบโครงสร้างเหล็กที่ปัจจุบันเป็นมีลักษณะเด่นเฉพาะตัว คือ มีโครงสร้างเป็นหน้าตัดรูปตัว I หรือ H (I/H-section) ที่ถูกขึ้นรูปด้วยแผ่นเหล็กที่ร้อนและตัดแปรรูปโดยการเชื่อมเป็นแนวให้มีช่องว่างอยู่ตรงกึ่งกลาง web ซึ่งมีระยะหน้าตัดช่องว่างตามระนาบและระยะห่างระหว่างช่องว่างที่เท่ากันอย่างสม่ำเสมอแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 อาคารโรงงานระบบโครงสร้าง Cellular Beam

ที่มา : The Steel Construction Institute, 2008

ในการออกแบบระบบโครงสร้าง Cellular steel beam นั้นจะต้องคำนึงถึงช่องเปิดตรงบริเวณ web เนื่องจากเป็นคานที่มีช่องว่างจึงไม่สามารถพิจารณาได้แบบคานทั่วไปโดยต้องพิจารณาทั้ง กำลังรับโมเมนต์ดัด, การโด่งเดาะ, ความหนาของหน้าตัด (Compactness and Local Buckling), แรงอัดแรงดึงตามแนวแกน, กำลังต้านทานการดัด (Vierendeel bending of tees), Web Post Buckling, การโก่งเดาะด้านข้าง (Lateral Torsional Buckling), แรงเฉือนในแนวตั้ง และ แรงเฉือนในแนวนอนในการศึกษานี้ ได้ทำการออกแบบโครงหลังคารับแรงลมตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 เปรียบเทียบระบบโครงสร้างหลังคาระหว่างรูปแบบ Pre Engineered steel Building (PEB) และ รูปแบบ Cellular Beam ที่ระยะความยาวหลังคา 20,30,40 และ 50 เมตร ความลาดเอียงหลังคา 5 และ 7.5 องศา และความสูงเสา 9 และ 12 เมตร โดยกำหนดกำลังของวัสดุเหล็กที่เหมือนกันและเปรียบเทียบน้ำหนักโครงสร้างเหล็กทั้งหมดต่อพื้นที่อาคารเพื่อให้ทราบว่ารูปแบบโครงสร้างหลังคาประเภทใดให้ปริมาณเหล็กที่น้อยกว่ากัน

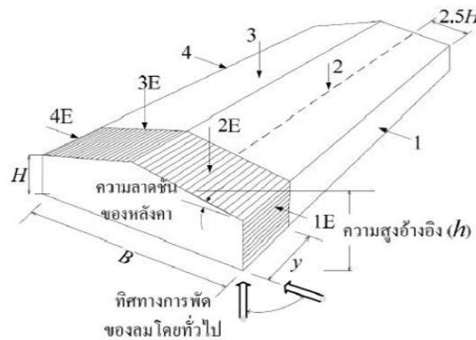
2. วิธีการศึกษา

ได้ทำการศึกษาในส่วนต่างๆ ตามลำดับดังนี้

- ออกแบบโครงหลังคาเหล็กรูปแบบ PEB
- ออกแบบโครงหลังคาเหล็กรูปแบบ Cellular beam

- ศึกษามาตรฐาน มยพ.1311-50 การคำนวณแรงลมของกรมโยธาธิการและผังเมือง
- เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ห่อแบบระหว่างโครงหลังคาเหล็กรูปแบบ PEB และรูปแบบ Cellular beam การศึกษานี้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง 3 มิติ RFEM เพื่อออกแบบโครงสร้างหลังคาเหล็กรูปแบบ Pre-Engineered steel Building (PEB) และ Cellular Beam ภายใต้แรงลมคำนวณตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.1311-50) กำหนดไว้ตามกฎหมายกระทรวง พ.ศ. 2566 [11] และออกแบบโครงสร้างอ้างอิงตามมาตรฐาน AISC (LRFD360-16) โดยได้ทำการจำลองโครงสร้างเพื่อทำการวิเคราะห์และออกแบบทั้งหมดจำนวน 32 กรณี ที่ระยะความยาวหลังคา 20, 30, 40 และ 50 เมตร ความลาดเอียงหลังคา 5 และ 7.5 องศา และความสูงเสา 9 และ 12 เมตร

3. การคำนวณแรงลมที่กระทำกับโครงสร้าง



ภาพที่ 3 รูปแรงลมกระทำด้านตั้งฉากกับสันหลังคาโดยตัวแปร H เท่ากับความสูง B เท่ากับความยาว ตัวแปร 1-4 และ 1E-4E เท่ากับโซนการรับแรงลมตามตารางที่ 1

ที่มา : มยพ.1311-50, 2007

ตัวอย่างการคำนวณแรงลมสำหรับโครงหลังคา ระยะยาว 20 เมตร ความชัน 5 และ 7.5 องศา ที่ความสูง (eave height) เท่ากับ 9 เมตร มีที่ตั้งอาคารในบริเวณ กทม. และ ปริมาณพล โดยอ้างอิงค่าความเร็วลมเฉลี่ย (V) เท่ากับ 25 เมตร/วินาที ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

3.1 หน่วยแรงลมอ้างอิง (q)

สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \frac{25^2}{9.81} = 39.82 \text{ กก./ม}^2 \quad (1)$$

โดย ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศมีค่าเท่ากับ 1.25 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร, v = ความเร็วลมอ้างอิง(เมตร/วินาที)

3.2 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ C_e

งานวิจัยนี้พิจารณาสภาพภูมิประเทศแบบ A (เปิดโล่ง) จะสามารถคำนวณค่า C_e ได้ตามสมการ

$$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} \geq 0.90 \quad (2)$$

โดยความสูงอ้างอิง (z) ของอาคารเดี่ยว สำหรับการคำนวณค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ จะใช้ค่าความสูงเฉลี่ย \bar{h} ของหลังคาเหนือพื้นดินสำหรับอาคารความสูงเสา 9 ม. ความสูงเฉลี่ยของหลังคา

โดย z = ความสูงอาคารจากพื้นดิน(หน่วยเป็นเมตร), \bar{h} = ความสูงเฉลี่ย(หน่วยเป็นเมตร)

$$\bar{h} = 9 + \frac{20}{2} \tan\left(\left(\frac{\pi}{180}\right)(0.5)\right) = 9.44 \text{ ม.} \quad (3)$$

ดังนั้น ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) จะมีค่าเท่ากับ

$$C_e = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} = \left(\frac{9.44}{10}\right)^{0.2} = 0.99 \geq 0.90 \quad (4)$$

โดย C_e = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ

3.3 ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกลม, C_g

ใช้ค่า $C_g = 2.0$ ทั้งค่าแรงลมกระทำภายนอกอาคารและภายในอาคาร ($C_{gi} = 2.0$ และ $C_g = 2.0$)

โดย $C_g =$ ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม, $C_{gi} =$ ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลมภายในอาคาร

3.4 ค่าหน่วยแรงลมภายในอาคาร

พิจารณากรณีที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เนื่องจากเป็นกรณีที่มีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ($C_{pi} = \pm 0.7$) การวิเคราะห์ที่ออกแบบจะให้ผลค่าที่มากที่สุด โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ห่ออกแบบภายใต้กรณีทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคาและขนานกับสันหลังคา โดยคำนวณใช้ค่าสูงสุดทั้งที่เป็นค่าลบ (แรงดูด) และค่าบวก (แรงกด) สามารถคำนวณหาหน่วยแรงลมภายในอาคาร (P_i) ได้ดังนี้ ใช้ค่าความสำคัญอาคารแบบปกติ $I_w = 1$

$$P_i = I_w q C_e C_g C_{pi} = 1 \times 39.8 \times 0.99 \times 2 \times (\pm 0.7) = \pm 55.75 \text{ กก./ตารางเมตร} \quad (5)$$

โดย $I_w =$ ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม, $C_{pi} =$ ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายใน, $P_i =$ หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า

3.5 คำนวณค่าหน่วยแรงลมสุทธิ

ระยะ $y =$ ค่าที่มากกว่าระหว่าง $2z$ กับ 6 เมตร ระยะ $z =$ ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 10% ของ 20 เมตร $= 2$ เมตรและ 40% ของ 9.44 เมตร เท่ากับ 3.77 เมตร ดังนั้น $z = 2$ เมตร ระยะ $y =$ ค่าที่มากกว่าของ $2 \times 2 = 4$ กับ 6 , ดังนั้น $y = 6$ เมตร ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมภายนอกใช้ค่าแตกต่างกันตามโซนของหลังคาตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน มยผ.1311-50 ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 1 สำหรับกรณีแรงลมตั้งฉากกับสันหลังคา และ ตารางที่ 2 สำหรับกรณีแรงลมขนานกับสันหลังคาตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ C_g C_p สำหรับกรณีแรงลมตั้งฉากกับสันหลังคา

ความลาดชันของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร							
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E
$0-5^\circ$	0.75	1.15	-1.3	-2.0	-0.7	-1.0	-0.55	-0.8

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ C_g C_p สำหรับกรณีแรงลมขนานกับสันหลังคา

ความลาดชันของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร											
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E	5	5E	6	6E
$0-90^\circ$	-0.85	-0.9	-1.3	-2.0	-0.7	-1.0	-0.85	-0.9	0.75	1.15	-0.55	-0.8

โดยเมื่อแทนค่า I_w , q , C_e ตามที่ระบุไว้ในหัวข้อก่อนหน้าจะสามารถคำนวณตัวอย่างค่าหน่วยแรงลมภายนอกอาคารและหน่วยแรงลมสุทธิที่กระทำต่อหลังคาของอาคารที่มีความสูงเสา 9 เมตร ได้ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 สำหรับกรณีทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา และ ขนานกับสันหลังคา ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แรงลมตั้งฉากกับสันหลังคา (กรณีเสาสูง 9 เมตร) หน่วยแรงลมภายในที่ใช้คำนวณ ± 55.75 (กก./ตรม.)

Zone	แรงลมตั้งฉากกับสันหลังคา (กก./ตรม.)			
	External Coefficient	หน่วยแรงลมภายนอก	หน่วยแรงลมภายในเป็นบวก	หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ
1	0.75	29.87	-25.88	85.61
1E	1.15	45.79	-9.96	101.54
2	-1.30	-51.77	-107.51	3.98
2E	-2.0	-79.64	-135.39	-23.89
3	-0.70	-27.87	-83.62	27.87
3E	-1.0	-39.82	-95.57	15.93
4	-0.55	-21.90	-77.65	33.85
4E	-0.80	-31.86	-87.60	23.89

3.6 การวิเคราะห์แรงภายในโครงหลังคา

พิจารณาการรวมน้ำหนักบรรทุก (Load Combination) ตามที่กำหนดไว้ในกฎกระทรวง พ.ศ.2566 คือ

$$U1 = 1.4DL+1.7LL, U2 = 1.05DL+1.275LL+1.6WL(Pi-)x, U3 = 1.05DL+1.275LL+1.6WL(Pi+)x$$

$$U4 = 1.05DL+1.275LL+1.6WL(Pi-)y, U5 = 1.05DL+1.275LL+1.6WL(Pi+)y$$

$$U6 = 0.9DL+1.6WL(Pi-)x, U7 = 0.9DL+1.6WL(Pi+)x, U8 = 0.9DL+1.6WL(Pi-)y, U9 = 0.9DL+1.6WL(Pi+)y$$

การคำนวณแรงลมภายในเป็นบวกและแรงลมภายในเป็นลบทุกกรณีตามทิศทางตั้งฉากกับสันหลังคา(ด้านแกน x) และทิศทางขนานกับสันหลังคา(ด้านแกน y) โดยจะเลือกกรณีแรงภายในสูงสุดมาออกแบบจากนั้นเลือกหน้าตัดที่เหมาะสม (Optimization) โดยคิดค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม (Superimposed Dead Load, SDL) เท่ากับ 15 กก./ตร.ม., น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load, LL) เท่ากับ 30 กก./ตร.ม., แรงลม (Wind Load, WL) ตามที่คำนวณอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.1311-50 และคิดช่วงระยะห่างเสา 6 เมตร จะได้ค่าแรงกระทำแบบ Uniform Load กระทำบนชิ้นส่วนของโครงเฟรมอาคารด้านต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4(a) และ 4(b)

ตารางที่ 4 แรงลมขนานกับสันหลังคา (กรณีเสาสูง 9 เมตร)หน่วยแรงลมภายในที่ใช้คำนวณ ± 55.75 (กก./ตร.ม.)

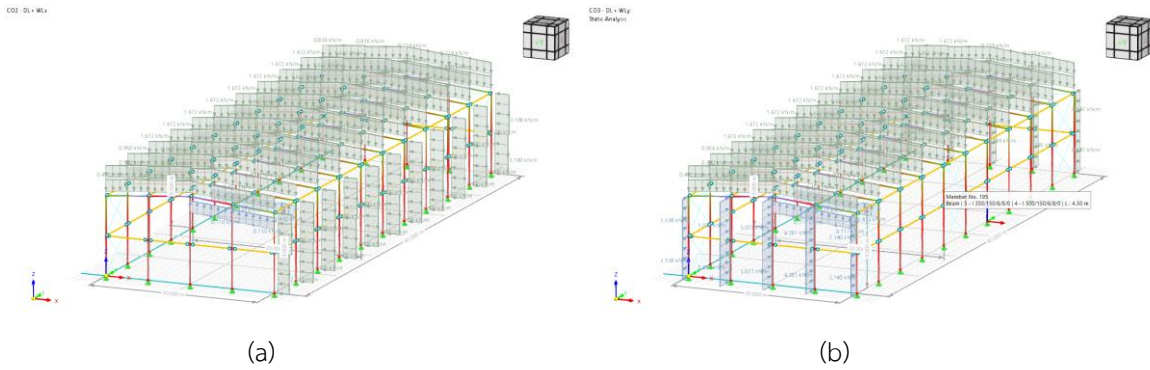
Zone	แรงลมขนานกับสันหลังคา (กก./ตร.ม.)			
	External Coefficient	หน่วยแรงลมภายนอก	หน่วยแรงลมภายในเป็นบวก	หน่วยแรงลมภายในเป็นลบ
1	-0.85	-33.85	-89.60	21.90
1E	-0.90	-35.84	-91.59	19.91
2	-1.30	-51.77	-107.51	3.98
2E	-2.0	-79.64	-135.39	-23.89
3	-0.70	-27.87	-83.62	27.87
3E	-1.0	-39.82	-95.57	15.93
4	-0.85	-33.85	-89.60	21.90
4E	-0.90	-35.84	-91.59	19.91
5	0.75	29.87	-25.88	85.61
5E	1.15	45.79	-9.96	101.54
6	-0.55	-21.90	-77.65	33.85
6E	-0.80	-31.86	-87.60	23.89

ตัวอย่างการคำนวณของกรณีเสาอาคารสูง 9 เมตร กรณีทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา

- แรงลมสุทธิ ด้านที่ 1 รวมกับด้านที่ 4 จะได้แรงลมสุทธิเท่ากับ = $85.61-33.85 = 51.77$ กก./ตร.ม.
ดังนั้นแรงกระทำที่เสาด้านที่ 1 = $51.77 \times 6 = 310.59$ กก./ม.
- แรงลมสุทธิ ด้านที่ 2 แรงลมสุทธิเท่ากับ = 3.98×6 ม. = 23.89 กก./ม. เป็นแรงกระทำต่อจันทันบนด้านที่ 2
- แรงลมสุทธิ ด้านที่ 3 แรงลมสุทธิเท่ากับ = 27.87×6 ม. = 167.24 กก./ม. เป็นแรงกระทำต่อจันทันบนด้านที่ 3

4. เกณฑ์พิจารณาค่าการแอ่นตัวของโครงสร้าง

สำหรับการพิจารณาค่าการแอ่นตัว Deflection Limit จะอ้างอิงค่าการแอ่นตัวประเภทหลังคาโรงงานอุตสาหกรรมและคลังสินค้าที่ไม่รองรับฟ้าพาดาน โดยใช้ค่าการแอ่นตัวภายใต้แรงกระทำ Live Load = $L/180$ และภายใต้การรวมแรงทั้งหมด Total Load (DL+LL) = $L/150$ ตามแนวปฏิบัติเพื่อการออกแบบ อาคารเหล็กสำเร็จรูปของ วสท. [12] ซึ่งเข้มงวดกว่าค่าที่ยอมให้ของมาตรฐาน IBC2012 [13] (ตารางที่ 1604.3) ซึ่งยอมให้ค่าการแอ่นตัวได้มากถึง $L/120$ ภายใต้แรงรวมทั้งหมดของ Total DL+LL และค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างขององค์อาคารใช้ค่าเกณฑ์ไม่เกิน $H/200$ ตามมาตรฐาน ASCE7-2016 [14]



ภาพที่ 4 (a) รูปแบบการใส่แรงลมกระทำตั้งฉากกับสันหลังคา (กก.นิวตัน/ม.) และ (b) รูปแบบการใส่แรงลมกระทำขนานกับสันหลังคา (กก.นิวตัน/ม.)

5. การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมสำเร็จรูป

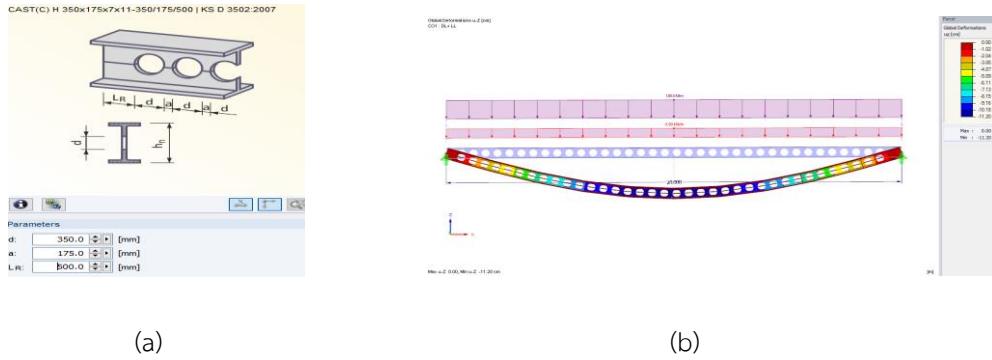
งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์แรงภายในโครงสร้างอย่างง่ายในรูปแบบคานช่วงเดียว (Simple Beam) รับแรงกระทำแบบ Uniform Load ด้วยโปรแกรม RFEM แล้วนำผลวิเคราะห์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมอีกตัวหนึ่งคือโปรแกรม SAP2000 ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางโครงสร้างที่เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยจากการวิเคราะห์จะได้ค่าแรงภายในโครงสร้างแล้วจึงนำไปออกแบบขนาดหน้าตัดเหล็ก ซึ่งจะสามารถกำหนดขนาดหน้าตัดเหล็กรูปแบบ Tapered Section ได้ทั้งเสาและจันทัน อีกทั้งโปรแกรม RFEM สามารถสร้างหน้าตัดแบบ Cellular beam ได้ตามขนาดเหล็กที่ตรงกับเหล็กที่ใช้ในประเทศไทยด้วย

จากการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างคานแบบ Cellular Beam ช่วงยาว 20 เมตร ได้ผลออกแบบว่าใช้เหล็กขนาด H-350x175x7x11 จึงใช้เหล็กขนาดดังกล่าวในการทดสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RFEM ในหัวข้อนี้ โดยสร้างแบบจำลองหน้าตัดเหล็กช่วงความยาว 20 เมตร ใช้เหล็กขนาด H-350x175x7x11, $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$, $G = 7700 \text{ kN/cm}^2$, $I_x = 13600 \text{ cm}^4$, $A = 63.14 \text{ cm}^2$ น้ำหนักเหล็กรูปพรรณ 78.50 kN/m², กำหนดค่า $SDL = 0.90 \text{ kN/m}$ (คิดจาก $SDL 15 \text{ kg/m}^2$ และความกว้าง Bay 6 เมตร), ค่า $LL = 1.80 \text{ kN/m}$ ($LL 30 \text{ kg/m}^2$ และความกว้าง Bay 6 เมตร) ให้จุดรองรับเป็นลักษณะแบบจุดหมุน Hinge ทั้ง 2 ข้าง

ค่าโก่งตัวตามทฤษฎีโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบ Uniform load, $\Delta = \frac{5WL^4}{384EI}$ แทนค่าสมการจะได้เท่ากับ $\frac{5(0.027) \times 2000^4}{384 \times 200000 \times 13600} = 20.68 \text{ ซม.}$ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RFEM ได้ค่าการโก่งตัวสูงสุดและค่าโมเมนต์เท่ากับ 20.76 ซม. และ 135 kN-m ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าการโก่งตัวของคานเหล็กช่วงเดียวยาว 20 เมตร

วิธีคำนวณหน้าตัด H-350x1175	ค่าโก่งตัว (ซม.)	% ต่างจากค่าทางทฤษฎี
RFAM	20.76	0.385
SAP2000	19.50	6.05
การคำนวณตามทฤษฎี	20.68	-



ภาพที่ 5 (a) หน้าตัดเหล็ก Cellular beam ในโปรแกรม RFEM และ (b) ค่าโก่งตัวแนวราบและค่าโมเมนต์ด้วยโปรแกรม RFEM 5 สำหรับหน้าตัด Cellular beam

เพื่อตรวจสอบการวิเคราะห์โครงสร้างของรูปแบบ Cellular Beam ได้ใช้การจำลองหน้าตัดเหล็กขนาด H-350x175x7x11 มาขยายความลึกแบบ Cellular Beam โดยกำหนดให้ขนาดรูเจาะ, $d = 350 \text{ mm}$, $I_x = 28040.60 \text{ cm}^4$, $A = 63.14 \text{ cm}^2$ กำหนดระยะห่างของรูเจาะ $a = 175 \text{ mm}$ ($= d/2$) และระยะ $L_R = 500 \text{ mm}$ ดังแสดงในภาพที่ 5(a) โดยใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกแบบเดียวกันกับที่วิเคราะห์โครงสร้างของรูปแบบ PEB ที่ช่วงยาว 20 เมตร

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RFEM จะได้ค่าการโก่งตัวและโมเมนต์ในคานเท่ากับ 11.20 ซม. 135 kN-m ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 5(b) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการโก่งตัวตามทฤษฎีโครงสร้างจากสูตร

$$\Delta = \frac{5WL^4}{384EI_{x-net}} \quad (6)$$

โดยค่า I_{x-net} ให้ใช้ค่า 90 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเหล็กเดิมก่อนแปลงเป็นหน้าตัดแบบ Cellular Beam (อ้างอิง Steel Design Guide 31, AISC [15]) เมื่อแทนค่าสมการจะได้เท่ากับ

$$\frac{5(0.027) \times 2000^4}{384 \times 20000 \times (0.9 \times 28040.6)} = 11.15 \text{ ซม.}$$

ดังแสดงในตารางที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างการใช้โปรแกรม RFEM และโปรแกรม SAP2000 และการวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวตามทฤษฎีจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันมาก แสดงถึงความถูกต้องของโปรแกรม RFEM ว่าสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างรูปแบบ PEB และ RFEM ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างหลังคากรณีศึกษาเปรียบเทียบต่างๆ ทั้งหมด

ตารางที่ 6 ค่าการโก่งตัวของหน้าตัดคานแบบ Cellular Beam ช่วงยาว 20 เมตร

หน้าตัด Cellular Beam แปลงจากเหล็ก H350x175	ค่าโก่งตัว (ซม.)	% แตกต่างจากค่าทางทฤษฎี
RFAM	11.20	0.446
การคำนวณตามทฤษฎี	11.15	-

6. การออกแบบโครงสร้างหลังคาแบบ PEB

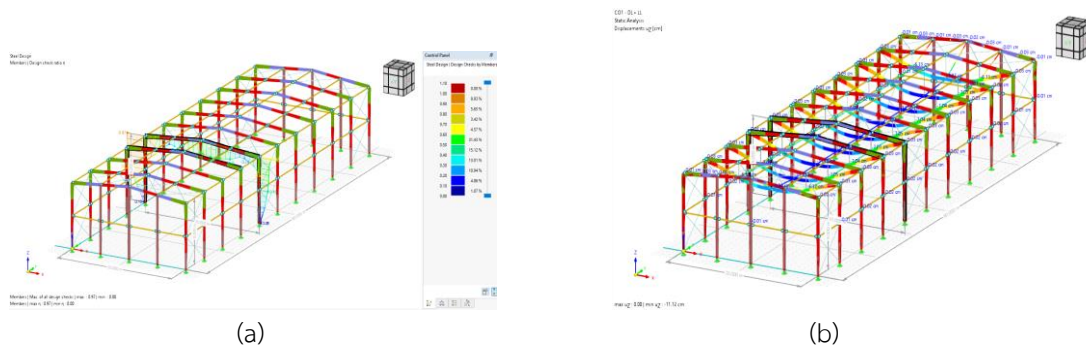
การออกแบบโครงสร้างหลังคาแบบ PEB ด้วยวิธี LRFD 360-16 ซึ่งใช้ขนาดเหล็กลักษณะหน้าตัด Tapered Section โดยหน้าตัดมีความลึกของแผ่นเวบ (Web) ไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดความยาวของเสาและคาน (Non-prismatic section) จุดต่อเสาคานของโครงสร้างแบบเป็น Rigid Frame และกำหนดฐานรองรับเป็นแบบจุดหมุน Hinge ซึ่ง สามารถ Optimization หน้าตัดในช่วงต่างๆ ตามแรงภายในที่เกิดขึ้นทำให้โครงสร้างหลังคาใช้ปริมาณเหล็กลดลง ขั้นตอนรายละเอียดการออกแบบ PEB อ้างอิง (Design Guide 25 Frame Design Using Web-Tapered Members) [15]

7. การออกแบบโครงสร้างหลังคาแบบ Cellular Beam

การออกแบบโครงสร้างรูปแบบ Cellular Beam จะใช้วิธี LRFD360-16 โดยการออกแบบเหล็กลักษณะหน้าตัด H-Section ที่เกิดจากการตัดช่วงครึ่งวงกลมและนำมาประกอบกันทำให้ความลึกหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณ H มีความสูงเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขนาดรูเจาะเท่ากับขนาดของคานเดิม ($Do = h$ เดิม) ระยะระหว่างรูเจาะเท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดรูที่เจาะ ($1.5Do$) และมีระยะห่างระหว่างขอบรูเจาะ (a) = $0.5Do$ มีผลทำให้คาน Cellular beam มีความลึกเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่าของคานเดิม ขั้นตอนรายละเอียดการออกแบบอ้างอิง (Design Guide31 Castlled and Cellular Beam Design) [16] Do = ระยะเจาะรูใช้เท่ากับความลึกของคาน, a = ระยะห่างริมของรูเจาะ, Se หรือ Lr = ระยะจากริมจรดรองรับขอบรูแรก, S = ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางรูเจาะ, e = ระยะต่างระหว่างขอบการตัด(loss)

8. การวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างรูปแบบ PEB และ Cellular Beam ด้วยโปรแกรม RFEM

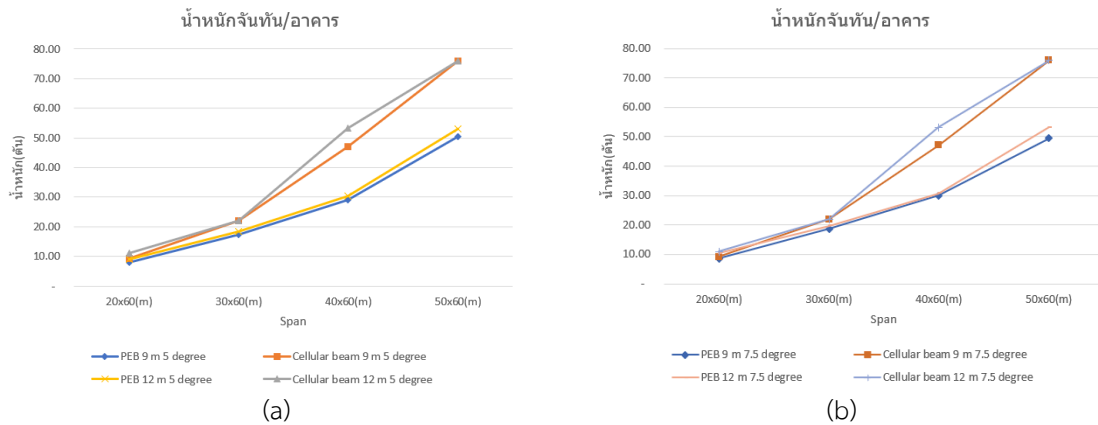
ทำการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างหลังคาอาคารกรณีศึกษาต่างๆ ด้วยโปรแกรม RFEM ภายใต้แรงลมดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1 รวมถึงค่าน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมต่างๆ (น้ำหนักบรรทุก $SDL = 0.15$ kN/sq.m. จากวัสดุเมทัลชีท ผนวกัน ความร้อนและแปมุงหลังคา, น้ำหนักบรรทุกจร $LL = 0.30$ kN/sq.m. โดยคำนวณเป็นแรงกระทำต่อจันทันแบบ Uniform load จากการคิดระยะห่างเสาช่วง Bay = 6 เมตร) การจัดระบบค้ำยัน (Wind bracing) มีทั้งองค์อาคารรับแรงแนวตั้ง (Vertical bracing) และแนวราบ (Horizontal bracing) เพื่อป้องกันแรงกระจายเข้าโครงจันทันหลักที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์รอบแกนรอง (Minor moment) ของโครงจันทันหลัก ช่วงเสาแรกและช่วงสุดท้ายของอาคาร กำหนดขึ้นชั้น X-brace ให้รับเฉพาะแรงดึงเท่านั้นโดยใช้เป็นเหล็กเส้นกลม ส่วนโครงสร้างค้ำยันอื่นๆ จะจำลองเป็นแบบ Pipe brace และยึดกับโครงสร้างหลักแบบ Pin Joint ได้ผลการวิเคราะห์ออกแบบดังตัวอย่างของโครงสร้างรูปแบบ PEB ดังแสดงในภาพที่ 6(a) และ 6(b)



ภาพที่ 6 (a) ค่า D/C (Demand/Capacity) < 1.0 ของโครงหลังคาถือว่าปลอดภัย (b) ค่าโก่งตัวในแนวราบ (Uz) ($DL+LL < L/150$)

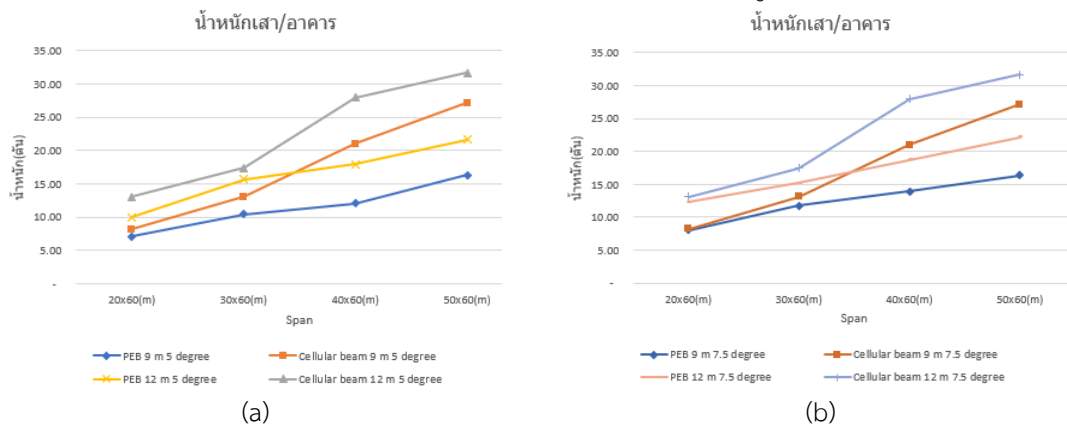
9. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างพบว่า โครงหลังคาแบบ PEB และ Cellular Beam ทั้ง 2 รูปแบบ เมื่อช่วงความยาว Span และความสูงของอาคาร รวมถึงความลาดชันของหลังคาเพิ่มขึ้น จะให้ค่าน้ำหนักเหล็กเพิ่มมากขึ้น และพบว่า โครงหลังคาแบบ PEB ให้ค่าน้ำหนักเหล็กน้อยกว่ารูปแบบ Cellular Beam ในทุกกรณีดังแสดงผลในภาพที่ 7-9 โดยภาพที่ 7(a) และ 7(b) แสดงผลเปรียบเทียบค่าน้ำหนักเหล็กของจันทัน สำหรับความลาดชันหลังคา 5 และ 7.5 องศา ตามลำดับ จากผลการศึกษาที่ช่วง Span 20 เมตรและ 30 เมตร จะมีน้ำหนักไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนจันทันรูปแบบ Cellular Beam ที่ช่วง Span 40 เมตรและ 50 เมตร มีความแตกต่างกันมากเนื่องจาก Cellular Beam หน้าตัด H-Beam มีข้อจำกัดขนาดหน้าตัดอัตราส่วน (h/bf)เมื่อนำมาประกอบให้ค่าความสูงหน้าตัด H-Beam ประมาณ 3 เท่าจากหน้าตัดเดิม ซึ่งแตกต่างรูปแบบ PEB สามารถประกอบหน้าตัดอัตราส่วน (h/bf) ความสูงต่อความกว้างหน้าตัดได้มากถึง 5-6 เท่า ทำให้ด้านทานโมเมนต์ได้เพิ่มขึ้น



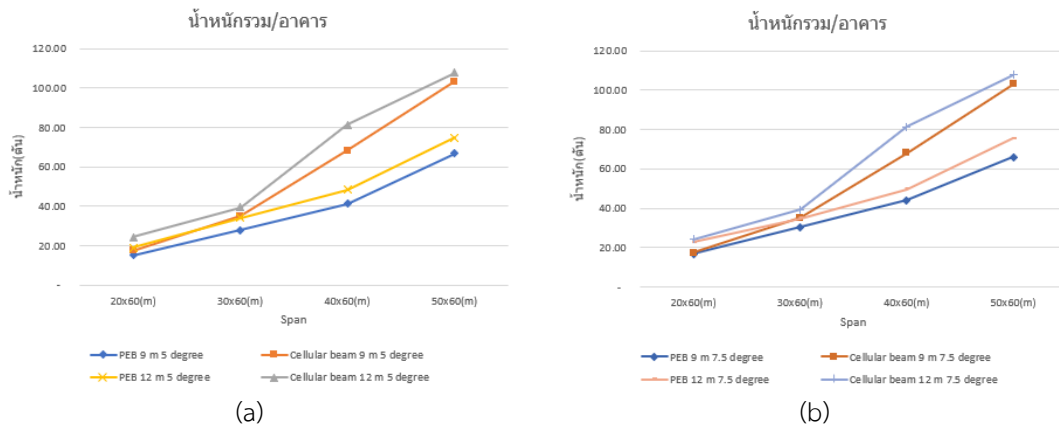
ภาพที่ 7 น้ำหนักจันทันโครงสร้างรูปแบบ PEB และ Cellular beam (หน่วย : ตัน) (a) ที่ความลาดชันหลังคา 5 องศา (b) ที่ความลาดชันหลังคา 7.5 องศา

ภาพที่ 8(a) และ 8(b) แสดงผลเปรียบเทียบค่าน้ำหนักเหล็กเสาของโครงหลังคารูปแบบ PEB และ Cellular Beam สำหรับความลาดชันหลังคา 5 และ 7.5 องศา ตามลำดับ จากผลการศึกษาน้ำหนักของเสาแบบ PEB 5 และ 7.5 องศา จะมีน้ำหนักเพิ่มตามความสูง เสาแบบ PEB ที่ช่วง Span 40 และ 50 ม.ให้ค่าน้ำหนักโครงหลังคาเหล็กน้อยกว่า รูปแบบ Cellular Beam เนื่องหน้าตัด H-Beam มีข้อจำกัดในการเลือกขนาดจะให้หน้าตัดใหญ่กว่า



ภาพที่ 8 น้ำหนักเสาโครงสร้างรูปแบบ PEB และ Cellular beam (หน่วย : ตัน) (a) ที่ความลาดชันหลังคา 5 องศา (b) ที่ความลาดชันหลังคา 7.5 องศา

ภาพที่ 9(a) และ 9(b) แสดงผลเปรียบเทียบค่าน้ำหนักรวมของเหล็กโครงหลังคารูปแบบ PEB และ Cellular Beam สำหรับความลาดชันหลังคา 5 และ 7.5 องศา ตามลำดับตามลำดับ จากผลการศึกษาน้ำหนักทั้งอาคารของรูปแบบ PEB 5 และ 7.5 องศา พบว่าช่วง Span 20 เมตรและ 30 เมตร ค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนช่วง Span 40 และ 50 ม. มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้ PEB ให้ค่าน้ำหนักโครงหลังคาเหล็กน้อยกว่า Cellular beam สาเหตุจากการออกแบบการรับโมเมนต์ที่ต้องการจากการ Optimization หน้าตัด PEB ตามกำลังรับโมเมนต์ที่ต้องการต่างจาก Cellular beam มีข้อจำกัดการเลือกหน้าตัด รวมทั้งข้อจำกัดด้านออกแบบต่างๆและอัตราส่วน (h/bf) ความสูงต่อความกว้างที่ทำได้น้อยกว่ารูปแบบ PEB



ภาพที่ 9 น้ำหนักเหล็กกรรมโครงสร้างรูปแบบ PEB และ Cellular beam (หน่วย : ตัน) (a) ที่ความลาดชันหลังคา 5 องศา และ (b) ที่ความลาดชันหลังคา 7.5 องศา

ตารางที่ 7 ตารางสรุปผลค่าน้ำหนักโครงหลังคาเหล็กโดยรวมทั้งอาคารระหว่าง PEB และ Cellular beam หน่วย : ตัน

ความลาดเอียงหลังคา (องศา) Span (m)	PEB				Cellular beam			
	ความสูงเสา 9 m		ความสูงเสา 12 m		ความสูงเสา 9 m		ความสูงเสา 12 m	
	5	7.5	5	7.5	5	7.5	5	7.5
20	14.6	16.6	18.9	22.6	17.3	17.4	24.05	24.1
30	27.7	30.5	34.0	34.9	29.4	35.0	39.3	39.4
40	41.0	43.9	48.3	49.5	65.5	68.0	80.9	81.2
50	66.8	65.8	74.7	75.3	99.4	103.1	107.3	107.7

ตารางที่ 8 ค่าน้ำหนักโครงหลังคาเหล็กเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างรูปแบบ PEB เทียบกับรูปแบบ Cellular Beam

ความลาดเอียงหลังคา (องศา) Span (m)	PEB และ Cellular beam			
	ความสูงเสา 9 m		ความสูงเสา 12 m	
	5	7.5	5	7.5
20	13.66	4.32	21.38	5.93
30	5.68	13.03	14.34	11.37
40	37.40	35.38	40.26	39.02
50	32.76	36.12	30.34	30.06

10.สรุป

จากผลการวิเคราะห์ออกแบบเปรียบเทียบน้ำหนักโครงหลังคาเหล็กโดยรวมของอาคารรูปแบบ PEB และรูปแบบ Cellular beam ภายใต้แรงลมที่กำหนดตามมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคารของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.1311-50) และใช้การออกแบบโครงสร้างเหล็กอ้างอิงตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 ด้วยวิธี LRFD ได้ผลสรุปโดยรวมว่าโครงสร้างรูปแบบ PEB มีน้ำหนักโครงหลังคาเหล็กน้อยกว่ารูปแบบ Cellular Beam ในทุกกรณี จากงานวิจัยนี้พบว่าช่วง Span 20 เมตรและ 30 เมตร รูปแบบ PEB ให้ค่าน้ำหนักโครงหลังคาเหล็กน้อยกว่ารูปแบบ Cellular Beam ประมาณ 5-20%, ช่วง Span 40 เมตร และ 50 เมตร รูปแบบ PEB ให้ค่าน้ำหนักโครงหลังคาเหล็กน้อยกว่ารูปแบบ Cellular Beam ประมาณ 30-40%



11. กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องมาจาก รศ.ดร. ทรงพล จารุวิศิษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินการค้นคว้างานวิจัย ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งงานวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ กราบขอบพระคุณอย่างสูง ขอกราบขอบคุณ ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์จิรภัทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา และได้มอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งให้ข้าพเจ้าได้พัฒนาตนเองยิ่งขึ้นไป ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้คำแนะนำและกำลังใจที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนด้วยดีตลอดมา

12. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pathak, B. A. (2017). Comparative study of pre-engineering building and conventional steel structure.
- [2] M.sai Deepka, K. P. K. (2018). Analysis, Design and optimization of pre engineered building subjected to different wind speeds. IJTIMES 4.
- [3] Robin Shhu , P. S. (2019). Comparative Study of Pre Engineered and Conventional Industrial Building. IJSRD.
- [4] Ibrahim, M. M., et al. (2020). Finite element investigation on plate buckling coefficients of tapered steel members web plates. Structures 28 : 2321-2334.
- [5] DPT 1311-50. (2007), Wind Load in Thailand (In thai)
- [6] Boonlert Khwanyuen. (2020). Comparison of Structural Factory Roof Weight between PEB Roof System and Conventional Steel Roof Building (CSB) under Design for Wind Load in Thailand. (In thai)
- [7] ANSI/AISC 360-16. (2016), AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Specification for Structural Steel Buildings.
- [8] Sonck, D. and J. Belis (2017). Lateral-Torsional Buckling Resistance of Castellated Beams. Journal of Structural Engineering 143(3).
- [9] Sukrawa (2017). Finite element modelling of reinforced large-opening on the web of steel beam considering axial forces.
- [10] Ponsorn P. and K. Phuvoravan (2020). Efficiency of Castellated and Cellular Beam Utilization Based on Design Guidelines. Practice Periodical on Structural Design and Construction 25(3).
- [11] MINISTERIAL REGULATION THAILAND. (2023), Determine the design of building structures and the characteristics and properties of materials used in structural work (In thai)
- [12] EIT. (2022), Guidelines for design prefabricated steel buildings For industrial buildings and warehouses (In thai)
- [13] IBC2012. (2012), INTERNATIONAL BUILDING CODE
- [14] ASCE 7-2016, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structure
- [15] Design Guide 25. (2018), AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Frame Design Using Web-Tapered Members
- [16] Design Guide 31. (2016), AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Castellated and Cellular Beam Design.
- [17] SCI. The Steel Construction Institute. (2008). Best practice in steel construction Industrial Buildings