

การศึกษาความแม่นยำของค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลที่ได้จาก Alignment Chart ด้วยโปรแกรม SAP2000

A study on accuracy of effective length factor values from Alignment Chart with SAP2000 software.

ชยุตม์ ลิ้มวงศธร และ รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

การคำนวณหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล (K factor) เพื่อนำไปคำนวณหากำลังรับแรงวิกฤตที่ก่อให้เกิดการโก่งเดาะขององค์อาคารเหล็กรับแรงอัดในโครงที่ไม่ถูกยึดรั้งวิธีที่เรียบง่ายและรวดเร็วคือการใช้ Alignment Chart โครงงานนี้ได้ศึกษาถึงความเหมาะสมของค่า K factor ที่ได้จาก Alignment Chart เพื่อตรวจสอบข้อจำกัดต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลโดยการเปรียบเทียบกับ K factor และกำลังรับแรงวิกฤตที่ก่อให้เกิดการโก่งเดาะจากผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ค่าไอเกนด้วยโปรแกรม SAP2000 โดยสร้างแบบจำลองศึกษาพิจารณาในประเด็นต่างๆประกอบด้วย เสาพิงในโครงเฟรม ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกันของเสาในโครงเฟรม น้ำหนักบรรทุกที่ต่างกันของเสาในโครงเฟรม ความเอียงของคานในโครงเฟรม และเสาขนาดหน้าตัดไม่คงที่ ได้ผลลัพธ์ว่าการมีอยู่ของเสาพิงในโครงเฟรมทำให้ค่า K factor จาก Alignment Chart ของเสาอื่นในโครงเฟรมขึ้นเดียวกันมีคลาดเคลื่อน เมื่อหน้าตัดของเสามีความแตกต่างกันมากขึ้นและน้ำหนักบรรทุกของเสามีความแตกต่างกันมากขึ้นค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มที่จะคลาดเคลื่อนมากขึ้น โดยผลลัพธ์ค่า K factor ของประเด็นที่กล่าวทั้งหมดเมื่อใช้วิธีการพิจารณาการโก่งเดาะของทั้งชั้นจะสามารถปรับปรุงให้ได้ค่าที่เหมาะสมเมื่อคานมีความเอียงเพิ่มขึ้นจาก 80 องศาไปที่ 85 องศา ความคลาดเคลื่อนของค่า K factor จะมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเสาที่มีขนาดไม่คงที่ ค่า K factor จะมีค่าที่คลาดเคลื่อนเมื่อใช้ค่าจาก Alignment Chart ดั้งเดิม

คำสำคัญ: ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล; Alignment Chart; การวิเคราะห์ค่าไอเกน

Abstract

A simple and quick method to calculate the effective length factor (K factor) for calculating the critical buckling strength of steel compression members in unbraced frames is the use of the Alignment Chart. This senior project studies on the accuracy of the K factor obtained from the Alignment Chart. To examine the limitations that cause errors in K factor by comparing the K factor and critical buckling strength obtained from the Alignment Chart with the results of Eigenvalue Analysis from SAP2000 software. The studied models were created on the following presence of leaning columns in frames, different moment of inertia of the columns in the frame, different loads of the columns in the frame, inclination angles of the beam in the frame and tapered columns. The results showed that the presence of leaning column in frames in the study can cause the error of K factor from Alignment Chart. The different moment of inertia of columns and the different loading of columns is proportional to the increasing error of the K factor. All the results mentioned can be improved by considering the story buckling approach. When the beam inclination is increased from 80 degrees to 85 degrees, the error is significantly larger. For tapered column there will be error in K factor when using original Alignment Chart

Keywords: Effective length factor; Alignment Chart; Eigenvalue Analysis

1. คำนำ

การออกแบบโครงสร้างเหล็กเพื่อเสถียรภาพตามที่ระบุใน (ANSI/AISC 360-16) ปัจจุบันมีหลายวิธีที่สามารถนำไปเลือกใช้หนึ่งในวิธีที่นำไปใช้ได้คือวิธี Effective Length โดยประเด็นสำคัญของวิธีดังกล่าวคือการคำนวณค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลหรือค่า K factor ให้ถูกต้องโดยค่า K factor นี้ใช้เพื่อปรับกำลังรับแรงอัดของค้ำอาคารรับแรงอัดหรือเสาความยาวต่างๆให้เทียบเท่ากับที่ความยาวเสาตรงปลายยึดหมุนทั้งสองปลายภายใต้น้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนใช้ โดยวิธีในการคำนวณค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลที่นิยมและเรียบง่ายวิธีหนึ่งคือการใช้ Alignment Chart ที่เป็นเครื่องมือแสดงความสัมพันธ์ของสมการอดิคัย (Transcendental Equation) ออกมาเป็นรูปภาพโดยสมการถูกพัฒนาขึ้นบนสมมติฐานต่างๆของโครงสร้างที่เรียบง่ายและเป็นอุดมคติแตกต่างจากโครงสร้างในความเป็นจริง ซึ่งทำให้เกิดคำถามว่าค่า K factor จากวิธีดังกล่าวมีความถูกต้องมากเพียงใด Roddis, Hamid, and Guo (1998) ได้ทำการศึกษาความเหมาะสมของค่า K factor ของโครงเฟรมและวิธีการปรับแก้ค่า K factor ที่มีความซับซ้อน งานศึกษาจะมุ่งเน้นโครงเฟรมและวิธีการปรับแก้ค่า K factor ที่เรียบง่ายและนำเสนอในประเด็นอื่นเพิ่มเติม

2. วรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำหนักบรรทุกกึ่งเดาะ

การโค้งตัวของเสาตรงโดยปลายยึดหมุนสามารถหมุนได้อย่างอิสระเมื่ออยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนเมื่อแก่สมการเชิงอนุพันธ์ที่มาจาก การวิเคราะห์สมดุลโมเมนต์ของหน้าตัดที่เกิดการโค้งตัวจะสามารถหา Elastic Buckling Load หรือ Critical Buckling Load คือน้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่เมื่อมากกว่าค่าหนึ่งๆจะทำให้เกิดการโค้งเดาะ ตามสมการ

$$P_c = EI \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \quad (1)$$

2.2 เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างที่ไม่มีการยึดรั้งในปัจจุบันวิธีหนึ่งที่ต้องพิจารณาใช้ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล คือวิธี Effective length โดยค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลใช้เพื่อปรับกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนที่มีจุดรองรับหรือจุดต่อต่างๆให้เท่ากับกับพฤติกรรมของเสาตรงที่ปลายยึดหมุนทั้งสองด้านภายใต้น้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนได้สมการดังนี้

$$P_c = \left(\frac{\pi EI}{KL} \right)^2 \quad (2)$$

K หมายถึงค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลหรือ K factor

Kavanagh (1962) ได้แสดงค่า K ของ ชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีลักษณะการยึดปลายแตกต่างกันทั้งค่า K ตามทฤษฎีที่ลักษณะการยึดปลายและการเคลื่อนที่ต่างๆ fully realized ค่า K ที่ใช้ในการออกแบบที่ในโครงสร้างจริงที่ไม่ fully realized โดยชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้แสดงน้อยครั้งที่จะนำไปใช้เพียงชิ้นส่วนเดียว ในการออกแบบโครงสร้าง

(American Institute of Steel Construction [AISC] 2016: 568-576)

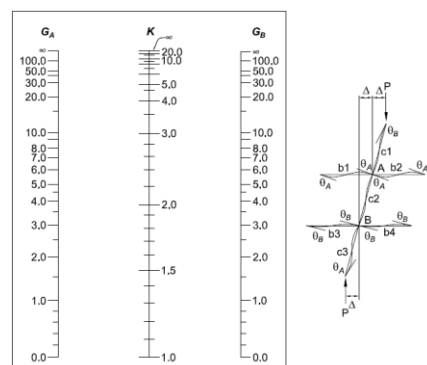
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Buckled shape of column is shown by dashed line						
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
End condition code						

รูปที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล K ชิ้นส่วนในอุดมคติ (AISC 2016: 570)

2.2.1 Alignment Chart

การวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างมักประกอบด้วยเสาและคาน ไม่ใช่เพียงชิ้นส่วนเดียว ๆ โดยต้องพิจารณาการเชื่อมต่อต่างๆของโครงสร้าง การหาค่า K ที่ละเอียดมากขึ้นสามารถใช้ Alignment Chart ในการหาค่า K ที่เหมาะสมขึ้นแต่ต้องระวังว่า Alignment Chart ถูกพัฒนาขึ้นบนสมมติฐานต่างๆ ที่ทำได้ยากในโครงสร้างจริง (Kavanagh, 1962) สมมติฐานต่างๆมีดังนี้

- (1) พฤติกรรมของวัสดุมีความยืดหยุ่น
- (2) ชิ้นส่วนทุกชิ้นส่วนมีหน้าตัดคงที่
- (3) จุดต่อทุกจุดต่อเป็นจุดต่อแข็งเกร็ง
- (4) สำหรับโครงเฟรมยึดรั้งการบิดหมุนที่ปลายคานทั้งสองมีค่าเท่ากัน ทิศทางต่างกันทำให้ชิ้นส่วนเกิดการโค้งตัวแบบโค้งเดียว
- (5) สำหรับโครงเฟรมไม่ยึดรั้งการบิดหมุนที่ปลายคานทั้งสองมีค่าเท่ากัน ทิศทางตรงกันทำให้ชิ้นส่วนเกิดการโค้งตัวแบบโค้งเดียว
- (6) ค่าความแข็งเกร็ง $L\sqrt{(P/EI)}$ ของเสาทุกต้นเท่ากัน
- (7) การถ่ายแรงต้านโมเมนต์ไปส่วนบนและล่างที่จุดต่อเสาเป็นสัดส่วนของค่า EI/L ของเสาทั้งสองเสา
- (8) เสาทุกต้นโค้งตัวพร้อมกัน
- (9) ไม่มีแรงกดในแนวแกนคานที่เป็นนัยสำคัญ
- (10) ไม่พิจารณาการเสียรูปจากแรงเฉือน



รูปที่ 2 Alignment Chart – โครงสร้างไม่ยึดรั้ง (โครงสร้างมีการเซ)

Alignment Chart สำหรับโครงสร้างยึดตั้งในรูป 3 ถูกสร้างขึ้นมาจากสมการ

$$\frac{G_A G_B}{4} (\pi/K)^2 + \frac{G_A + G_B}{2} \left[I - \frac{\pi/K}{\tan(\pi/K)} \right] + \frac{2I \tan(\pi/K)}{(\pi/K)} - I = 0 \quad (3)$$

Alignment Chart สำหรับโครงสร้างไม่ยึดตั้งในรูป 2.3 ถูกสร้างขึ้นมาจากสมการ

$$\frac{G_A G_B (\pi/K)^2 - 36}{6(G_A + G_B)} - \frac{(\pi/K)}{\tan(\pi/K)} = 0 \quad (4)$$

โดย

$$G = \frac{\sum (EI/L)_{col}}{\sum (EI/L)_g} \quad (5)$$

ตัวห้อย A และ B บ่งบอกถึงตำแหน่งจุดต่อของเสาที่พิจารณา ตัวห้อย col และ g บ่งบอกถึงผลรวมที่จุดต่อต่างๆของเสาและคานตามลำดับ

2.2.2 เสถียรภาพของทั้งชั้น

สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือการโก่งตัวสำหรับโครงสร้างที่มีการเข็นขึ้นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งชั้นโดยเกี่ยวข้องกับชั้นส่วนที่ต้านแรงด้านข้างทุกชั้นส่วนและเกี่ยวข้องกับผลรวมของน้ำหนักบรรทุกต่อเสาทุกเสาในชั้น จึงไม่มีเสาเดี่ยวใดๆที่สามารถโก่งตัวอย่างเดียว ๆ โดยเสาอื่นในชั้นเดียวกันไม่โก่งพร้อมกัน

ในโครงสร้างที่มีการเขเสาที่เป็นลักษณะยึดหมุนทั้งสองปลายคือไม่เป็นส่วนหนึ่งของโครงข้อแข็งการคำนวณตามปกติจะพบว่า มีค่าความยาวประสิทธิผลเท่ากับ ∞ ซึ่งจะไม่สามารถรับแรงตามแนวแกนได้ เรียกเสาประเภทนี้ว่าเสาพิง (leaning column) การออกแบบเสาพิงจะกำหนดให้เสาทำหน้าที่รับเฉพาะด้านกำลัง (strength) เท่านั้น โดยใช้ $K = 1.0$ ก็จะสามารถออกแบบเสาได้ส่วนพฤติกรรมด้านความเสถียร (stability) ให้เสาต้นอื่นๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นโครงข้อแข็งทำหน้าที่แทน ดังนั้นเสาทุกต้นในส่วนที่ประกอบขึ้นเป็นโครงข้อแข็งนอกจากจะต้องทำหน้าที่รับแรงยังจะต้องช่วยค้ำยันเสาพิงให้มีความเสถียรภาพ (ทักซิณ เทพชาติรี 2554: 50-52) หนึ่งในวิธีที่นำความเสถียรภาพของทั้งชั้นมาพิจารณาคือวิธี

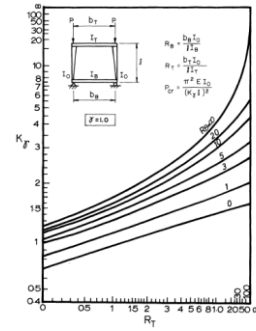
Story buckling approach (Yura, 1971).

$$K_2 = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{P_{story}}{\sum \frac{\pi^2 EI}{(K_{n2} L)^2}} \right]} \geq \sqrt{\frac{5}{8}} K_{n2} \quad (7)$$

โดยค่า K_{n2} ค่าคือค่า K factor ที่ได้จาก Alignment Chart โดยตรง

2.2.3 เสาหน้าตัดไม่คงที่

สำหรับเสาที่หน้าตัดไม่คงที่ (Tapered column) Lee, Morrell, and Ketter (1972) ได้พัฒนา Chart สำหรับโครงเฟรมประกอบด้วย Tapered column และคานที่หน้าตัดคงที่ ในอัตราส่วนต่างๆของความลึกหน้าตัดที่เล็กและใหญ่สุด ตัวอย่างดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 Chart สำหรับ Tapered column ในโครงสร้างไม่ยึดตั้งอัตราส่วน 1 (AISC 1974: 37)

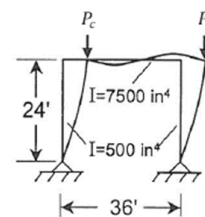
3. เปรียบเทียบวิธีการศึกษา

3.1 การวิเคราะห์ Linear elastic buckling analysis ด้วยโปรแกรม SAP2000

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม SAP2000 V21.0.2 วิเคราะห์โดย load case buckling ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ Eigenvalue analysis เป็นการวิเคราะห์รูปแบบเดียวกันกับวิธี Linear elastic buckling analysis โดยการวิเคราะห์จะตั้งค่าให้ใช้น้ำหนักบรรทุกไม่รวมน้ำหนักของชั้นส่วนโครงสร้าง (self-weight multiplier = 0)

3.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของผลจากโปรแกรม SAP2000

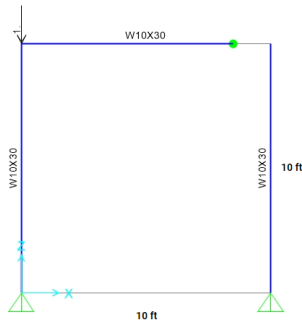
ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม SAP2000 จะทำการทดลองวิเคราะห์ตัวอย่างแล้วจึงเปรียบเทียบค่าที่ได้ รูปที่ 4 แสดงตัวอย่าง 1A อ้างอิงมาจาก (AISC-SSRC 2003: 5) และรูปที่ 5 แสดงตัวอย่าง 2 จะถูกสร้างแบบจำลองขึ้นแล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4 โจทย์ตัวอย่าง 1A (AISC-SSRC 2003: 5)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่า P_c ระหว่างค่าที่ได้จาก SAP2000 และ FEA solution ของ AISC-SSRC 2003

	SAP2000	FEA solution.	%Diff.
P_c	413 kips	416 kips	0.72



รูปที่ 5 โจทย์ตัวอย่าง 1A
(AISC-SSRC 2003: 5)

เสาและคานหน้าตัด W10x30 (170 in⁴)

$$G_{Top} = \frac{\sum(EI/L)_{col}}{\sum(EI/L)_g} = \frac{170/10}{0.5(170/10)} = 2$$

$$G_{Bot} = 1000 \text{ (จุดรองรับยึดหมุน)}$$

$$\text{ได้ } K = 2.626$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 \times 29000 \times 170}{(2.626 \times 120)^2} = 490.00 \text{ kips}$$

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่า P_c ระหว่างค่าที่ได้จาก SAP2000 และจากการคำนวณ

	SAP2000	การคำนวณ	%Diff.
P_c	472.42 kips	490.00 kips	3.59

จากตารางที่ 3.1 และ 3.2 ที่มาจากตัวอย่าง 1A และ 2 ตามลำดับได้ว่าค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากแหล่งอ้างอิงและการคำนวณมีค่าไม่เกิน 5%

3.2 การหาค่า Effective length factor จาก Alignment Chart

ในงานวิจัยนี้จะหาค่า Effective length factor หรือค่า K factor จากการแก้สมการ (2.4) ด้วยการใช้ภาษาโปรแกรม Python โดยข้อกำหนด ค่า G มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 และค่า K factor ที่ได้มีทศนิยม 3 ตำแหน่ง รายละเอียดดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7

```
import math
x1=float(input("Enter G"))
x2=float(input("Enter Gb"))
K=float(1.00000)
while abs((((math.pi/x)**2)*x1*x2-36)*math.tan((math.pi/x))-((math.pi/x)*(6*(x1+x2)))) > 0.10 :
    K=round(K+0.00001,5)
    print(K)
print(round(K,3))
```

รูปที่ 6 รายละเอียดชุดคำสั่งภาษา Python ที่ใช้ในการแก้สมการ (ค่า G 0 -100)

```
import math
x1=float(input("Enter G"))
x2=float(input("Enter Gb"))
K=float(1.00000)
while abs((((math.pi/x)**2)*x1*x2-36)*math.tan((math.pi/x))-((math.pi/x)*(6*(x1+x2)))) > 0.15 :
    K=round(K+0.00001,5)
    print(abs((((math.pi/x)**2)*x1*x2-36)*math.tan((math.pi/x))-((math.pi/x)*(6*(x1+x2))))))
print(round(K,3))
```

รูปที่ 7 รายละเอียดชุดคำสั่งภาษา Python ที่ใช้ในการแก้สมการ (ค่า G = 1000)

3.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องการหาค่า K factor ด้วย โปรแกรม ภาษา Python

การตรวจสอบความถูกต้องจะอ้างอิงค่าที่ถูกต้องพอดี (Salama 2014: 159) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า K factor จากโปรแกรมภาษา Python

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่า K factor ระหว่างค่าที่ถูกต้องพอดีและจากโปรแกรมภาษา Python

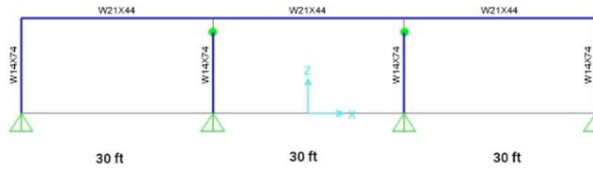
G_A	G_B	Exact value	Python	$\frac{\text{Exact value}-\text{Python}}{\text{Exact value}} \times 100$
0.1	0.4	1.083	1.082	-0.09
0.25	0.25	1.083	1.082	-0.09
0.1	0.9	1.159	1.158	-0.09
0.25	0.75	1.162	1.161	-0.09
0.5	0.5	1.164	1.163	-0.09
0.1	1.9	1.286	1.285	-0.08
0.25	1.75	1.295	1.295	0.00
0.5	1.5	1.307	1.307	0.00
1	1	1.317	1.317	0.00
0.5	4.5	1.575	1.574	-0.06
1	4	1.634	1.633	-0.06
2.5	2.5	1.711	1.711	0.00
0.5	9.5	1.777	1.777	0.00
1	9	1.874	1.874	0.00
2.5	7.5	2.092	2.092	0.00
5	5	2.228	2.228	0.00
50	4	2.949	2.949	0.00
50	10	3.948	3.948	0.00
100	50	7.476	7.477	0.01

3.3 การศึกษาความเหมาะสมของค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลจาก Alignment Chart

งานศึกษานี้ศึกษาความเหมาะสมของการใช้ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลที่มาจาก Alignment Chart ซึ่งนำแนวคิดของ Story buckling approach ของ Yura (1971) และ Chart ของ Lee et al. (1972). มาพิจารณาด้วยในบางประเด็นที่เกี่ยวข้อง โดยนำค่าที่ได้ไปคำนวณ Buckling load เปรียบเทียบกับ Buckling load ที่มาจากการคูณ Buckling Factor จาก โปรแกรม SAP2000 และเปรียบเทียบค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลที่ได้จาก ทั้ง 2 วิธีโดย ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลจากโปรแกรม SAP2000 มาจากการการแก้สมการ (1.2) ด้วย Buckling Factor ที่ได้ โดยตัวอย่างโครงเฟรมชิ้นส่วนทุกชิ้นส่วนใช้มาตรฐานเกรดเหล็ก A36 (E=29000ksi) จะถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาในประเด็นดังต่อไปนี้

3.3.1 เสาทึ่ง

รูปที่ 8 แสดงโครงขงโยทขรสร้งทข้ใช้ศกขในประเด้นน้ข้งองมจก (Smith 1933:165) ขอรสร้งถูขมตอขงนโดยม่ขการยดขร้งทข้ขอรสร้งเกดการค้ดรอบแกนหลักเมอเกดการโก่งตัวข้ข้นส่วนทข้ข้นส่วนใช้มตรฐนกรดเหล็ก A36 (E=29000ksi) เสहन้ดขขนาด W14X74 คนहन้ดขขนาด W21X44 เสहनในท้ขงต่นถูกยดทมนทข้ปลยท้ขงข้งเสहनอกยดทมนทข้จขดรองบและจขดขมตอขบคนเป็นจขดตอขอข้งโดยเสहतต่นรับน้หนักบรททุกเท่กขกัน



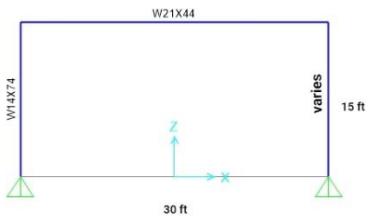
รูปที่ 8 โยทข้ใช้ศกข 1

3.3.2 ค่ขมเมนค้ความเดอขที่แตกต้งกันของเสहनขอรขพรม

รูปที่ 9 แสดงขอรสร้งตัวอย่างในประเด้นน้ขขนาดहन้ดขและขนาดมดทข้ใช้ศกขจะอ้งองจกนโยทข้ตัวอย่างขอที่ 3.3.1 โดยขอรสร้งเหลอเพียง 1 ข่วงเสहन ท้ขการศกขให้เสहनเปลยขนขนาดहन้ดขค้ขงมค้ขมเมนค้ความเดอขท้ขงข้งดขงขรขที่ 4

ขอรขที่ 4 ขนคहन้ดขค้ขงนโยทข้ใช้ศกข 2

ขนคहन้ดขค้ขง	มเมนค้ความเดอขรอบแกนหลัก (in ⁴)	อ้ดขรขส่วนมเมนค้ความเดอขระหว่ขงเสहन (Varies/W14X74)
W16X67	954	1.2
W21X57	1170	1.5
W24X62	1550	2
W24X94	2700	3.5
W24X162	5170	6.5
W36X135	7800	10



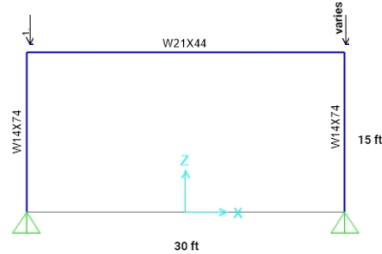
รูปที่ 9 โยทข้ใช้ศกข 2

3.3.3 น้หนักบรททุกทข้ต้งกันของเสहनขอรขพรม

รูปที่ 10 แสดงขอรสร้งตัวอย่างในประเด้นน้ขขนาดहन้ดขและขนาดมดทข้ใช้ศกขจะอ้งองจกนโยทข้ตัวอย่างขอที่ 3.3.1 โดยขอรสร้งเหลอเพียง 1 ข่วงเสहन และให้น้หนักบรททุกทข้เสहन้หนักบรททุกทข้แตกต้งกันดขงขรขที่ 5

ขอรขที่ 5 น้หนักบรททุกทข้ใช้นโยทข้ใช้ศกข 3

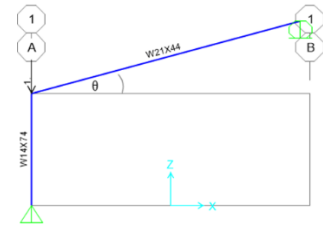
น้หนักบรททุกทข้เสहनข้ขง (kips)	น้หนักบรททุกทข้เสहनขว (kips)
1	0.01
1	0.10
1	2
1	50



รูปที่ 10 โยทข้ใช้ศกข 3

3.3.4 มุมของคนเออขงนขอรขพรม

รูปที่ 11 แสดงขอรสร้งตัวอย่างในประเด้นน้ขขนาดहन้ดขและขนาดมดทข้ใช้ศกขจะอ้งองจกนโยทข้ตัวอย่างขอที่ 3.3.1 โดยขอรสร้งเสहन 1 ต่นขมตอขบคนโดยทข้ปลยคนด้นกลมขการยดทมน โดยให้คนเปลยขนองศขความเออขง 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 80°, 85° และ 90°



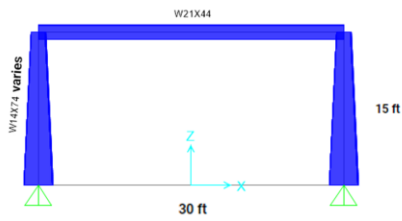
รูปที่ 11 โยทข้ใช้ศกข 4

3.3.5 เสहन้ดขม่คงทข้นขอรขพรม

รูปที่ 12 แสดงขอรสร้งตัวอย่างในประเด้นน้ขขนาดहन้ดขและขนาดมดทข้ใช้ศกขจะอ้งองจกนโยทข้ตัวอย่างขอที่ 3.3.1 โดยขอรสร้งเสहन 1 ข่วงเสहन ท้ขการศกขให้เสहनเปลยขนขนาดहन้ดขค้ดขลตขความยวเสहनข้ขงท้ขให้เสहन้ดขม่คงทข้ขมตอขบคนท้ขมีहन้ดขค้ขงท้ขดขงขรขที่ 5

ขอรขที่ 5 ขนคहन้ดขค้ขงนโยทข้ใช้ศกข 5

อ้ดขรขส่วนคขมลขงहन้ดขเสहन	มเมนค้ความเดอขรอบแกนหลักน้ขยสุด (in ⁴)	มเมนค้ความเดอขรอบแกนหลักมขสุด (in ⁴)
0.5	795	3748.16
2	795	3748.15
4	795	18757.03
6	795	50183.62



รูปที่ 12 โหลดที่ใช้ศึกษา 5

4. ผลการดำเนินงานศึกษา

การศึกษาความแม่นยำของค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลที่ได้จาก Alignment Chart ด้วยโปรแกรม SAP2000 จากการวิเคราะห์โครงสร้างเฟรมไม้อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ในประเด็นที่สนใจ มีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้

4.1 โหลดที่เกี่ยวข้องกับเสาพิง

ผลการศึกษาโหลดที่ใช้ศึกษา 1 ดังรูปที่ 11 ได้ทำการคำนวณค่า K factor ที่มาจากการหาด้วยวิธี Alignment Chart นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณหา K factor จากผล Critical Buckling Load ด้วยโปรแกรมและค่า K factor จากสมการที่ 2.6 ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 5 และ 6 พิจารณาเสายานนอกหน้าตัด W14X74 (795 in⁴) และ คานหน้าตัด W21X44 (843 in⁴)

Alignment Chart

$$G_{Top} = \frac{\sum(EI/L)_{col}}{\sum(EI/L)_g} = \frac{795/15}{0.5(843/30)} = 3.772$$

$$G_{Bot} = 1000 \text{ (จุดรองรับยึดหมุน)}$$

$$\text{ได้ } K = 3.108$$

SAP 2000

$$P_c = 359.46 \text{ kips} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(K \times 180)^2}$$

$$\text{ได้ } K = 4.420$$

Story buckling approach

$$K_2 = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 EI}{L^2}}{P_r} \left[\frac{P_{story}}{\sum \frac{\pi^2 EI}{(K_{n2} L)^2}} \right]}$$

$$= \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(180)^2}}{1} \left[\frac{4}{\left(\frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(3.108 \times 180)^2} + 0 + 0 + \frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(3.108 \times 180)^2} \right)} \right]} \geq \sqrt{\frac{5}{8}} = 3.108$$

$$\text{ได้ } K = 4.395$$

ตารางที่ 6 ผลค่า K factor และ Buckling load โหลดที่ใช้ศึกษา 1

	SAP2000	Alignment Chart	Story buckling approach
K factor	4.420	3.108	4.395
P_c	359.48 kips	727.04 kips	359.46 kips

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบค่า K factor และ Buckling load โหลดที่ใช้ศึกษา 1

	SAP2000 vs Alignment Chart $\left(\frac{\text{SAP2000-Chart}}{\text{SAP2000}} \times 100 \right)$	SAP2000 vs Story buckling approach $\left(\frac{\text{SAP2000-Story}}{\text{SAP2000}} \times 100 \right)$
K factor	29.68 %	0.57 %
P_c	-102.25%	0.01 %

จากผลดังตารางที่ 6 และ 7 พบว่าการหาค่า K factor โดยพิจารณาเพียงคุณสมบัติของเสาต้นที่พิจารณาในวิธี Alignment Chart อยู่นั้นได้ผล Critical Buckling Load มากกว่าความเป็นจริงถึง ร้อยละ 102.25 โดยค่า K factor ที่เหมาะสมคือ 4.420 ในขณะที่การใช้ Alignment Chart ให้ค่า K factor 3.108 ซึ่งคลาดเคลื่อนที่ ร้อยละ 29.68% และเมื่อใช้วิธี Story buckling approach ที่พิจารณาคุณสมบัติของเสาทุกต้นในโครงสร้างซึ่งรวมถึงเสาพิงได้ค่า K factor และ Buckling load คลาดเคลื่อนเพียง ร้อยละ 0.57 และ ร้อยละ 0.01 ตามลำดับ

4.2 โหลดที่เกี่ยวข้องกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกันของเสาในโครงเฟรม

ผลการศึกษาโหลดที่ใช้ศึกษา 2 ดังรูปที่ 9 ได้ทำการคำนวณค่า K factor ที่มาจากการหาด้วยวิธี Alignment Chart นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณหา K factor จากผล Critical Buckling Load ด้วยโปรแกรม และ ค่า K factor จากสมการที่ 7 พร้อมคำนวณ Buckling Load ด้วยค่า K factor ที่ได้จาก วิธี Alignment Chart และ สมการ 6 ได้ผลการศึกษาดังตาราง 8 9 และ 10 และรูปที่ 13

แสดงตัวอย่างการคำนวณกรณี เสาหน้าตัด W14X74 (795 in⁴)

(W14X74)

Alignment Chart

$$G_{Top} = \frac{\sum(EI/L)_{col}}{\sum(EI/L)_g} = \frac{795/15}{(843/30)} = 1.886$$

$$G_{Bot} = 1000 \text{ (จุดรองรับยึดหมุน)}$$

$$\text{ได้ } K = 2.592$$

SAP 2000

$$P_c = 1059.21 \text{ kips} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(K \times 180)^2}$$

$$\text{ได้ } K = 2.575$$

Story buckling approach

$$K_2 = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{P_{story}}{P_r} \right]}{\sum \frac{\pi^2 EI}{(K_{n2} L)^2}}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(180)^2} \left[\frac{2}{\left(\frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(2.592 \times 180)^2} + \frac{\pi^2 \times 29000 \times 954}{(2.702 \times 180)^2} \right)} \right]}{1}} \geq \sqrt{\frac{5}{8}} = 2.592$$

ได้ K = 2.527

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบค่า K factor และ Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 2

เสาต้นขวา		SAP2000	SAP2000	SAP2000	SAP2000
		vs Alignment Chart ซ้าย	vs Alignment Chart ขวา	vs Story buckling approach ซ้าย	vs Story buckling approach ขวา
W14X74	K factor	1.72 %	1.72 %	1.72 %	1.72 %
	P_c	-3.52 %	-3.52 %	-3.52 %	-3.52 %
W16X67	K factor	-0.66 %	4.21 %	1.86 %	1.86 %
	P_c	1.31 %	-8.98 %	-3.83 %	-3.83 %
W21X57	K factor	-3.18 %	6.62 %	2.08 %	2.08 %
	P_c	6.06 %	-14.67 %	-4.30 %	-4.30 %
W24X62	K factor	-6.15 %	9.55 %	2.64 %	2.64 %
	P_c	11.25 %	-22.23 %	-5.49 %	-5.49 %
W24X94	K factor	-10.57 %	13.87 %	3.91 %	3.91 %
	P_c	18.20 %	-34.80 %	-8.30 %	-8.30 %
W24X162	K factor	-13.83 %	17.08 %	5.21 %	5.21 %
	P_c	22.83 %	45.43 %	11.30 %	11.30 %

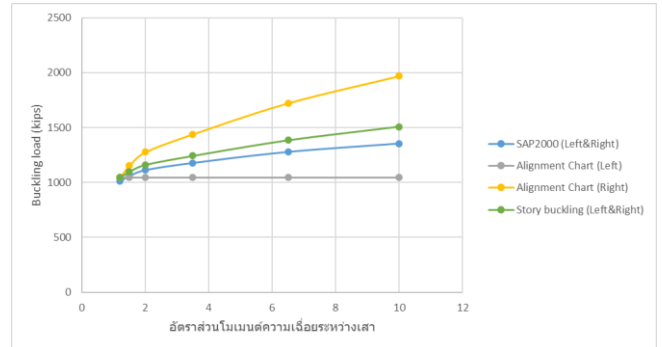
ตารางที่ 9 ผลค่า K factor โจทย์ที่ใช้ศึกษา 2

K factor SAP2000 ซ้าย	K factor SAP2000 ขวา	K factor (chart) ซ้าย	K factor (chart) ขวา	K factor (story) ซ้าย	K factor (story) ขวา
2.637	2.637	2.592	2.592	2.592	2.592
2.575	2.821	2.592	2.702	2.527	2.768
2.512	3.048	2.592	2.846	2.460	2.984
2.442	3.410	2.592	3.084	2.377	3.320
2.344	4.320	2.592	3.721	2.253	4.151
2.277	5.807	2.592	4.815	2.158	5.504

ตารางที่ 10 ผลค่า Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 2

ค่า P_c SAP2000 ซ้าย	ค่า P_c SAP2000 ขวา	ค่า P_c (chart) ซ้าย	ค่า P_c (chart) ขวา	ค่า P_c (story) ซ้าย	ค่า P_c (story) ขวา
1009.76	1009.76	1045.32	1045.32	1045.32	1045.32
1059.21	1059.21	1045.32	1154.33	1099.83	1099.83

1112.80	1112.80	1045.32	1276.05	1160.69	1160.69
1177.81	1177.81	1045.32	1439.65	1242.48	1242.48
1277.92	1277.92	1045.32	1722.65	1383.99	1383.99
1354.54	1354.54	1045.32	1969.93	1507.63	1507.63



รูปที่ 13 เปรียบเทียบค่า Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 2

4.3 โจทย์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกันของเสาในโครงเฟรม

ผลการศึกษาโจทย์ที่ใช้ศึกษา 3 ดังรูปที่ 10 ได้ทำการคำนวณค่า K factor ที่มาจากการหาด้วยวิธี Alignment Chart นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณหา K factor จากผล Critical Buckling Load ด้วยโปรแกรม และ ค่า K factor จากสมการที่ 7 พร้อมคำนวณ Buckling Load ด้วยค่า K factor ที่ได้จาก วิธี Alignment Chart และ สมการ 6 ผลการศึกษาดังตารางที่ 11 12 และ 13 และรูปที่ 14 แสดงตัวอย่างการคำนวณเฉพาะ Story buckling approach กรณี น้ำหนักบรรทุกที่เสาต้นขวา (kips) = 0.01 kips

เสาต้นขวา (W14X74)

Story buckling approach

$$K_2 = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{P_{story}}{P_r} \right]}{\sum \frac{\pi^2 EI}{(K_{n2} L)^2}}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 \times 29000 \times 954}{(180)^2} \left[\frac{1.01}{\left(\frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(2.592 \times 180)^2} + \frac{\pi^2 \times 29000 \times 795}{(2.592 \times 180)^2} \right)} \right]}{0.01}} \geq \sqrt{\frac{5}{8}} = 2.592$$

ได้ K = 18.4

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบค่า K factor และ Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 3

น้ำหนัก บรรทุก เสาต้นขวา		SAP2000	SAP2000	SAP2000	SAP2000
		vs Alignment Chart ซ้าย	vs Alignment Chart ขวา	vs Story buckling approach ซ้าย	vs Story buckling approach ขวา
0.01	K factor	-37.57 %	86.24 %	2.24 %	2.24 %
	P_c	47.16 %	-5184.07 %	-4.64 %	-4.64 %

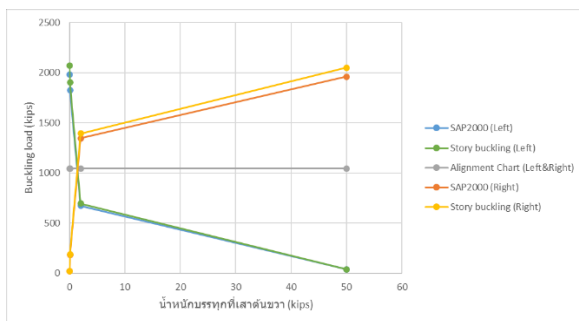
0.1	K factor	-32.03 %	58.25 %	2.08 %	2.08 %
	P_c	42.64 %	-473.63 %	-4.30 %	-4.30 %
2	K factor	19.80 %	-13.42 %	1.78 %	1.78 %
	P_c	-55.48 %	22.26 %	-3.65 %	-3.65 %
50	K factor	80.64 %	-36.91 %	2.22 %	2.22 %
	P_c	-2567.32 %	46.65 %	-4.60 %	-4.60 %

ตารางที่ 12 ผลค่า K factor โจทย์ที่ใช้ศึกษา 3

K factor SAP2000	K factor SAP2000	K factor (chart)	K factor (chart)	K factor (story)	K factor (story)
ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
1.884	18.842	2.592	2.592	1.842	18.420
1.963	6.208	2.592	2.592	1.922	6.079
3.232	2.285	2.592	2.592	3.175	2.245
13.387	1.893	2.592	2.592	13.089	1.851

ตารางที่ 13 ผลค่า Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 3

ค่า P_c SAP2000	ค่า P_c SAP2000	ค่า P_c (chart)	ค่า P_c (chart)	ค่า P_c (story)	ค่า P_c (story)
ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
1978.25	19.7825	1045.32	1045.32	2069.94	20.70
1822.28	182.228	1045.32	1045.32	1900.58	190.06
672.34	1344.68	1045.32	1045.32	696.88	1393.76
39.19	1959.5	1045.32	1045.32	40.99	2049.65



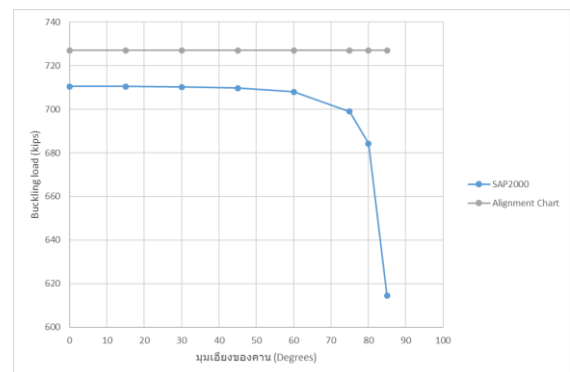
รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่า Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 3

4.4 โจทย์ที่เกี่ยวข้องมุมของคานเอียงในโครงเฟรม

ผลการศึกษาโจทย์ที่ใช้ศึกษา 4 ดังรูปที่ 11 ได้ทำการคำนวณค่า K factor ที่มาจากการหาด้วยวิธี Alignment Chart นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณหา K factor จากผล Critical Buckling Load ด้วยโปรแกรม รายละเอียดผลการศึกษาดังตารางที่ 14 และรูปที่ 15

ตารางที่ 14 ผลและการเปรียบเทียบค่า K factor และ Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 4

มุมของคาน		SAP2000	Alignment Chart Method	SAP2000 vs Alignment Chart Method
0°	K factor	3.144	3.108	1.15
	P_c	710.51 kips	727.04 kips	-2.33
15°	K factor	3.144	3.108	1.15
	P_c	710.45 kips	727.04 kips	-2.34
30°	K factor	3.145	3.108	1.18
	P_c	710.23 kips	727.04 kips	-2.37
45°	K factor	3.146	3.108	1.21
	P_c	709.67 kips	727.04 kips	-2.45
60°	K factor	3.150	3.108	1.33
	P_c	707.98 kips	727.04 kips	-2.69
75°	K factor	3.170	3.108	1.96
	P_c	698.92 kips	727.04 kips	-4.02
80°	K factor	3.204	3.108	3.00
	P_c	684.29 kips	727.04 kips	-6.25
85°	K factor	3.381	3.108	8.07
	P_c	614.55 kips	727.04 kips	-18.30
90°	K factor	31811210	∞	-
	P_c	6.94E-12 kips	0 kips	



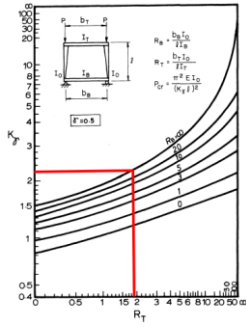
รูปที่ 15 เปรียบเทียบค่า Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 4

4.5 โจทย์ที่เกี่ยวข้องกับเสาหน้าตัดไม่คงที่ในโครงเฟรม

ผลการศึกษาโจทย์ที่ใช้ศึกษา 5 ดังรูปที่ 12 ได้ทำการคำนวณค่า K factor ที่มาจากการหาด้วยวิธี Alignment Chart นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณหา K factor จากผล Critical Buckling Load ด้วยโปรแกรม และค่า K factor จาก Chart ของ Lee et al. (1972) รายละเอียดผลการศึกษาดังตารางที่ 15 และ 16 แสดงตัวอย่างการคำนวณเฉพาะ Chart ของ Lee et al. กรณีอัตราส่วนความลึกหน้าตัดเสา 0.5

$$R_T = \frac{b_T I_0}{I_T} = \frac{30 \times 795}{15 \times 843} = 1.886$$

$$R_B = \infty$$



รูปที่ 16 Chart ที่ใช้ในโจทย์ที่ใช้ศึกษา 5

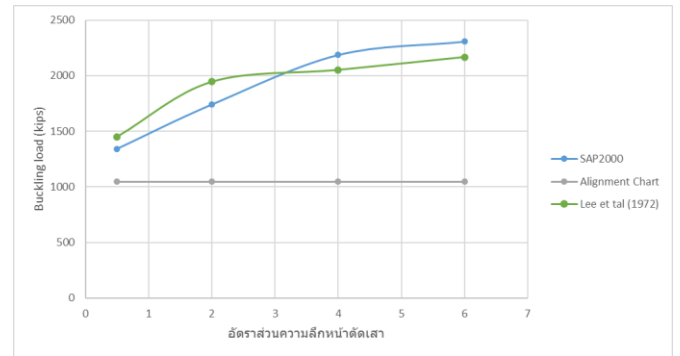
ได้ $K = 2.2$

ตารางที่ 15 ผลค่า K factor และ Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 5

อัตราส่วนความลิกหน้าตัดเสา		SAP2000	Alignment Chart	Chart ของ Lee et al. (1972)
0.5	K factor	2.287	2.592	2.2
	P_c	1342.81 kips	1045.32 kips	1451.02 kips
2	K factor	2.008	2.592	1.9
	P_c	1741.59 kips	1045.32 kips	1945.42 kips
4	K factor	1.792	2.592	1.85
	P_c	2187.57	1045.32 kips	2052.00 kips
6	K factor	1.744	2.592	1.8
	P_c	2308.21	1045.32 kips	2167.58 kips

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบค่า K factor และ Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 5

อัตราส่วนความลิกหน้าตัดเสา		SAP2000 vs Alignment Chart ($\frac{\text{SAP2000-Chart}}{\text{SAP2000}} \times 100$)	SAP2000 vs Chart ของ Lee et al. ($\frac{\text{SAP2000-Chart}}{\text{SAP2000}} \times 100$)
0.5	K factor	-13.34 %	3.80 %
	P_c	22.15 %	-8.06 %
2	K factor	-29.08 %	5.38 %
	P_c	39.98 %	-11.70 %
4	K factor	-44.64 %	-3.24 %
	P_c	52.22 %	6.20 %
6	K factor	-48.62 %	-3.21 %
	P_c	54.71 %	6.09 %



รูปที่ 17 เปรียบเทียบค่า Buckling load โจทย์ที่ใช้ศึกษา 5

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความแม่นยำของค่าตัวคูณความยาวประสิทธิภาพที่ได้จาก Alignment Chart ซึ่งค่าตัวคูณความยาวประสิทธิภาพมีความสำคัญในการคำนวณ Buckling load โดยทำการสร้างแบบจำลองต่างๆเพื่อใช้เป็นโจทย์ที่ใช้ในการศึกษาด้วยโปรแกรม SAP2000 แล้วจึงวิเคราะห์ Eigenvalue analysis แล้วเปรียบเทียบกับผลของค่าตัวคูณความยาวประสิทธิภาพที่ได้จาก Alignment Chart โดยจะพิจารณาในประเด็นต่างๆดังนี้ เสาพิงในโครงเฟรม ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกันของเสาในโครงเฟรม น้ำหนักบรรทุกที่ต่างกันของเสาในโครงเฟรม ความเอียงของคานในโครงเฟรม และ เสาขนาดหน้าตัดไม่คงที่ในโครงเฟรม

ประเด็นเสาพิง: ในการศึกษาการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิภาพที่ได้จาก Alignment Chart โดยเมื่อมีเสาพิงในโครงเฟรมได้ผลว่าค่า K factor คลาดเคลื่อนจาก K factor จากโปรแกรม SAP2000 ที่ร้อยละ 29.68 เมื่อใช้วิธี story buckling approach ซึ่งเป็นการพิจารณาว่าเสาจะทำหน้าที่รับกำลังด้านความเสถียรแทนเสาพิง ได้ค่า K factor ที่คลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 0.57 โดยการใช้ Alignment Chart โดยไม่ใช้วิธี story buckling approach เข้ามาพิจารณาและออกแบบเสาพิงโดยใช้ค่า K factor = 1 อาจส่งผลให้เกิดการออกแบบที่ไม่ปลอดภัยได้จากการไม่พิจารณาถึงภาระที่เสาอื่น ๆ ในโครงสร้างต้องรับกำลังด้านความเสถียรแทนเสาพิง

ประเด็นขนาดเสา: ศึกษาจากแบบจำลองโครงเฟรมหนึ่งช่วงเสาโดยให้เสาใดเสาหนึ่งเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดซึ่งมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่มากขึ้น ผลที่ได้คือ เสาที่มีค่าความเฉื่อยของเสามากกว่า จะให้ค่า K factor ที่คลาดเคลื่อน โดยเมื่อนำไปคำนวณ Buckling load จะให้ค่าที่มากกว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม SAP2000 ตรงกันข้ามในส่วนเสาที่มีค่าความเฉื่อยของเสาน้อยกว่าจะให้ค่า Buckling load ที่น้อยกว่าค่าที่เหมาะสมจากโปรแกรม SAP2000 ซึ่งมีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้นเมื่อหน้าตัดของเสามีความแตกต่างกันมากขึ้นโดยเมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาแตกต่างกัน 10 เท่า ค่า Buckling load สามารถคลาดเคลื่อนถึงร้อยละ 45.43 ในเสาที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมากกว่าและคลาดเคลื่อนถึงร้อยละ 22.83 ในเสาที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำกว่าเมื่อใช้วิธี story buckling approach ซึ่งพิจารณาว่าเสาที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมากกว่าจะช่วยยึดรั้งเสาที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำกว่านั้นได้ผลว่าค่า Buckling load ของเสาทั้งสองต้นคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 11.30 สอดคล้องกับแนวคิดว่าการโค้งตัวของเสา

ทั้งสองต้นนั้นต้องเกิดขึ้นพร้อมกันโดยเสาต้นใดต้นหนึ่งไม่สามารถโก่งตัวก่อนได้ เป็นสาเหตุให้เสาที่อ่อนแอกว่ามีกำลังรับด้านความเสถียรที่มากขึ้นจากการที่เสาที่แข็งแรงกว่าช่วยยึดรั้งซึ่งทำให้กำลังรับด้านความเสถียรของเสาที่แข็งแรงกว่านั้นมีค่าน้อยลง

ประเด็นน้ำหนักบรรทุก: ศึกษาจากแบบจำลองโครงเฟรมหนึ่งช่วงเสา โดยให้เสาใดเสาหนึ่งเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกผลที่ได้คือ เสาที่รับน้ำหนักบรรทุกมากกว่า จะให้ค่า K factor ที่คลาดเคลื่อน โดยเมื่อนำไปคำนวณ Buckling load จะให้ค่าที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม SAP2000 ในส่วนของเสาที่รับน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่าจะให้ค่า Buckling load ที่มากกว่าค่าที่เหมาะสม ซึ่งมีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้นเมื่อการรับน้ำหนักบรรทุกมีความแตกต่างกันมากขึ้นโดยเมื่อน้ำหนักบรรทุกของเสาแตกต่างกัน 100 เท่า ค่า Buckling load ในเสาที่รับน้ำหนักมากกว่านั้นสามารถคลาดเคลื่อนโดยมีค่า Buckling load น้อยกว่าที่ค่าที่เหมาะสมถึงร้อยละ 47.16 ในเสาที่รับน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่านั้นจะคลาดเคลื่อนไปอย่างมาก เมื่อใช้วิธี story buckling approach เป็นการพิจารณาว่าเสาที่มีรับน้ำหนักบรรทุกไม่ถึงกำลังรับน้ำหนักด้านความเสถียรของเสาต้นนั้น จะสามารถช่วยยึดรั้งเสาอื่นที่รับน้ำหนักมากกว่าได้ได้ผลว่าค่า Buckling load ของเสาทั้งสองต้นคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 4.64 สอดคล้องกับแนวคิดว่าการโก่งตัวของเสาทั้งสองต้นนั้นต้องเกิดขึ้นพร้อมกันโดยเสาต้นใดต้นหนึ่งไม่สามารถโก่งตัวก่อนได้ เป็นสาเหตุให้เสาที่รับน้ำหนักมากกว่ามีกำลังรับด้านความเสถียรที่มากขึ้นจากการที่รับน้ำหนักน้อยกว่ารับน้ำหนักยังไม่ถึงจุดวิกฤติที่ทำให้เกิดการโก่งตัวซึ่งไปช่วยยึดรั้งได้ในแง่ของการออกแบบทำให้สามารถพิจารณาการออกแบบหน้าตัดของเสาที่เหมือนกันเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกันมากๆ ได้

ประเด็นความเอียงคาน เมื่อความเอียงของคานแตกต่างกันศึกษาจากแบบจำลองโครงสร้างเสาหนึ่งต้นเชื่อมต่อกับคานโดยที่ปลายคานด้านไกลการยึดหมุน โดยให้คานเปลี่ยนแปลงองศาความเอียง 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 80°, 85° และ 90° ได้ผลว่า ที่ความเอียง 80 องศาเมื่อขยับความเอียงขึ้นไปที 85 องศา ค่าความคลาดเคลื่อนจะมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ร้อยละ 18.30 และเมื่อคานเอียงมากขึ้นไปถึง 90 องศา ซึ่งขึ้นส่วนจะถูกพิจารณาจากคานไปเป็นเสา ค่าที่ได้จาก Alignment Chart มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จาก SAP2000 สามารถสรุปได้ว่าการใช้ Alignment Chart ความเอียงของคานในโครงเฟรมที่พิจารณาไม่ควรเกิน 80 องศา

ประเด็นเสาน้ำตัดไม้คองที่ ศึกษาจากโครงสร้างเสา 1 ช่วงเสา ทำการศึกษาให้เสาเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดตลอดความยาวเสาซึ่งทำให้เสามีหน้าตัดไม้คองที่เชื่อมต่อกับคานที่มีหน้าตัดคองที่ได้ผลค่า K factor คลาดเคลื่อนจาก K factor จากโปรแกรม SAP2000 เนื่องจาก การใช้วิธี Alignment Chart ไม่ครอบคลุมถึงเงื่อนไขของโครงเฟรมในโจทย์ที่ศึกษาในสมมุติฐานของ Alignment Chart ข้อที่ (2) ขึ้นส่วนทุกชั้นส่วนมีหน้าตัดคองที่ เมื่อใช้ค่า K factor ที่ได้จาก Chart ของ Lee et al. (1972) จะทำให้ค่า K factor สอดคล้องกับค่าจากโปรแกรม SAP2000 โดยควรใช้ Chart ของ Lee et al. (1972) ในการออกแบบเมื่ออัตราส่วนอัตราส่วนความลึกหน้าตัดเสามากกว่า 4 เพื่อความคลาดเคลื่อนที่น้อยและปลอดภัย

เอกสารอ้างอิง

- ทักษิณ เทพชาติ (2554). "เสาพิง," โยธาสาร, ปีที่ 23:1, หน้า 50-62
- AISC-SSRC (2003b), "Basic Design for Stability: Lecture 3—Frame Stability—Alignment Charts and Modifications," American Institute of Steel Construction and Structural Stability Research Council, Chicago, IL.
- AISC (1974), Supplement No. 3 to the Specification for the Design, Fabrication & Erection of Structural Steel for Building, American Institute of Steel Construction, New York, N.Y.
- AISC (2016), Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, July 7.
- Kavanaugh, T. C. "Effective Length of Framed Columns," Transactions, ASCE, 127, 1962, Part II, pp. 81-101.
- Lee, G., Morrell, M., & Ketter, R. (1972). "Design of tapered members", WRC bulletin, No. 173, pp.1-32.
- Roddis, W. & Abdul Hamid, Hazlan & Guo, CQ. (1998), "K Factors for Unbraced Frames: Alignment Chart Accuracy for Practical Frame Variations", ENGINEERING JOURNAL-AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION INC. 35.pp. 81-93.
- Salama, M.I. (2014), "New simple equations for effective length factors," HBRC Journal, HBRC, Vol. 10, No. 2, pp. 156-159.
- Smith, J. C. (1996). "Structural Steel Design: LRFD Approach." 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Yura, J.A. (1971), "The Effective Length of Columns in Unbraced Frames," Engineering Journal, AISC, Vol. 8, No. 2, pp. 37-42.