# การประมาณค่าการโก่งเดาะนอกระนาบของโครงข้อหมุนเหล็ก โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

# ESTIMATION ON OUT OF PLANE BUCKLING VALUE OF STEEL TRUSS BY FINITE ELEMENT METHOD

นพดล วิริยา

NOPPADON WIRIYA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-093-010

# การประมาณค่าการโก่งเดาะนอกระนาบของโครงข้อหมุนเหล็กโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

# ESTIMATION ON OUT OF PLANE BUCKLING VALUE OF STEEL TRUSS BY FINITE ELEMENT METHOD

นพดล วิริยา
NOPPADON WIRIYA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562
KMITL-2019-EN-M-093-010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ESTIMATION ON OUT OF PLANE BUCKLING VALUE OF STEEL TRUSS BY FINITE ELEMENT METHOD

NOPPADON WIRIYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-M-093-010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2019
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---------------------------------------

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การประมาณค่าการโก่งเดาะนอกระนาบของโครงข้อหมุนเหล็กโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์
**Thesis Title** Estimation on out of Plane Buckling Value of Steel Truss by Finite Element Method
**นักศึกษา** นายนพดล วิริยา
**รหัสประจำตัว** 59601280
**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
**สาขาวิชา** วิศวกรรมโยธา
**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร
**หมายเลขวิทยานิพนธ์** KMITL-2019-EN-M-093-010

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|---|---|---|
| รศ.เอนก | ศิริพานิชกร | |
| รศ.สุวัฒน์ | ถิรเศรษฐ์ | |
| ผศ.ดร.อำพน | จรัสจรุงเกียรติ | |
| ผศ.ดร.อาทิตย์ | เพชรศศิธร | |

**วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ** วันอังคารที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2562 เวลา 14.00-16.00 น.
**สถานที่สอบ** ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

**คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว**

**(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)**

**คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**วันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2562**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การประมาณค่าการโก่งเดาะนอกระนาบของโครงข้อหมุนเหล็ก โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ |
| **นักศึกษา** | นายนพดล วิริยา |
| **รหัสประจำตัว** | 59601280 |
| **ปริญญา** | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมโยธา |
| **พ.ศ.** | 2562 |
| **อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** | ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร |


**บทคัดย่อ**

โครงถักเป็นโครงสร้างที่รับแรงกระทำแล้วเกิดแรงภายในชิ้นส่วนเป็นแรงอัดและแรงดึงในแนวแกน โดยแรงอัดส่งผลต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะ การโก่งเดาะจึงมีความสำคัญกับการออกแบบโครงถัก ในการออกแบบโครงถักผู้ออกแบบมักคำนึงถึงเพียงการโก่งเดาะในระนาบที่รับแรงเท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงการโก่งเดาะนอกระนาบของโครงถัก ดังนั้นการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดและซึ่งโครงถักแต่ละรูปแบบต่างก็มีความซับซ้อนมาก และยังขึ้นอยู่กับรูปแบบโครงถักของตามลักษณะประโยชน์ใช้สอยแต่ละแบบ การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นหาค่าประมาณตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถักและลดการโก่งเดาะนอกระนาบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงถัก จากการศึกษาพบว่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถักมีค่าไม่แน่นอนตามรายละเอียดรูปแบบโครงถักแต่ละรูปแบบ





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **Thesis** | Estimation on Out of Plane Buckling Value of Steel Truss by Finite Element Method. |
| **Student** | Mr.Noppadon Wiriya |
| **Student ID.** | 59601280 |
| **Degree** | Master of Engineering |
| **Program** | Civil Engineering |
| **Year** | 2019 |
| **Thesis Advisor** | Asst.Prof.Dr.Arthit Phetchsasithon |


## ABSTRACT

Truss is a structure that resists external loads with only compressive forces and tensile forces in the structural members. Buckling is the most important factor in compressive member design. In most cases, only in-plane buckling is considered while out of plane buckling is ignored or incorrectly designed. Since out of plane buckling coefficient plays an important role in compressive member design of truss and is considerably complicate to be evaluated and depends on structural forms based on its function of use. This study was aimed to evaluate lateral buckling coefficient using a finite element program to simplify the truss design process. From the study, it was found that the out of plane buckling coefficient of simply-supported truss was observed be depended on truss patterns.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธรที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจเสมอมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

นพดล วิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.......... I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.......... II
กิตติกรรมประกาศ.......... III
สารบัญ.......... IV
สารบัญตาราง.......... VI
สารบัญรูปภาพ.......... VIII
บทที่ 1 บทนำ.......... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.......... 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.......... 1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.......... 1
1.4 แนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย.......... 2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.......... 2
1.6 ขอบเขตการศึกษา.......... 3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.......... 4
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.......... 4

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.......... 5
2.1 กล่าวนำ.......... 5
2.2 โครงสร้างส่วนรับแรงดึง.......... 5
2.2.1 เกี่ยวกับโครงสร้างรับแรงดึง.......... 5
2.2.2 ลักษณะการวิบัติของโครงสร้างส่วนรับแรงดึง.......... 6
2.3 โครงสร้างส่วนรับแรงอัด.......... 7
2.4 กำลังรับน้ำหนักของเสาเดี่ยว.......... 8
2.5 ผลของการยึดปลายเสาที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักของเสา.......... 13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.......... 16
2.6.1 บทคัดย่อ.......... 16
2.6.2 บทนำ.......... 17
2.6.3 การทดลอง.......... 17
2.6.3.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.......... 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3.2 รายละเอียดแบบจำลอง.....19
2.6.3.3 รายละเอียดการทดสอบ.....20
2.6.3.3.1 การทดสอบแบบ Rigid lateral support.....21
2.6.3.3.2 การทดสอบแบบ Flexible lateral support.....26
2.6.4 สรุปผล.....29

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....30
3.1 แนวคิดในการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล.....31
3.2 ชิ้นส่วนของโครงถักในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรม.....32
3.3 ขอบเขตที่นำมาศึกษาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง.....32
3.4 กรณีที่นำมาศึกษาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....37
3.5 วิธีดำเนินการศึกษา.....38

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....42
4.1 กรณีศึกษาแรกมีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ.....42
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร.....42
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร.....43
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร.....44
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร.....45
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรกรณีศึกษาแรก.....46
4.2 กรณีศึกษาที่สองมีค้ำยันทางข้าง บริเวณกึ่งกลางขนาดหน้าตัด 45x45x2มิลลิเมตร และ ชิ้นส่วน 40x40x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ.....47
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร.....47
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร.....48
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร.....49
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร.....50
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรกรณีศึกษาสอง.....51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 กรณีศึกษาที่สามไม่มีจุดรอบรับทางข้าง บริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ....52
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร....52
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร....53
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร....53
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร....54
4.3.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรกรณีศึกษาสาม....54
4.4 กรณีศึกษาที่สี่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ ชิ้นส่วน20x20x2 มิลลิเมตรชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับแต่เพิ่มชิ้นส่วนถักชิ้นส่วนย่อยให้ถี่ขึ้นแต่ความยาวโดยรวม เท่าเดิม....55
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร....55
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร....56
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร....57
4.4.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร....58
4.4.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรกรณีศึกษาสี่....59

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....60
5.1 ผลการวิจัยเมื่อเปรียบเทียบตามกรณีศึกษา....60
5.2 สรุปผล....62
5.3 ข้อเสนอแนะ....63

เอกสารอ้างอิง....64

ภาคผนวก....65

ประวัติผู้เขียน....124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

1.1 รายละเอียดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ ตามขอบเขตการศึกษานี้ ........ 3

2.1 แสดงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดกับ ระยะการโก่งเดาะของชิ้นส่วนรับแรงอัดเปรียบเทียบ ระหว่างแบบจำลองจริงกับผลการคำนวณทางโปรแกรม ........ 26

2.2 แสดงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งเดาะของชิ้นส่วนรับแรงอัด เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองจริงกับผลการคำนวณทางโปรแกรม ........ 28

3.1 รายละเอียดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ ตามขอบเขตการศึกษานี้ ........ 32

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร ........ 42

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร ........ 43

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร ........ 44

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร ........ 45

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักกรณีศึกษาแรก ........ 46

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร ........ 47

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร ........ 48

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร ........ 49

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร ........ 50

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักกรณีศึกษาสอง ........ 51

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร ........ 52

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร ........ 53

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร ........ 53

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร ........ 54

4.3.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักกรณีศึกษาสาม ........ 54

4.4.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร ........ 55

4.4.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร ........ 56

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร ........ 57

4.4.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร ........ 58

4.4.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักกรณีศึกษาสี่ ........ 59

5.1 สรุปค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของแต่ละกรณีการศึกษา ........ 60


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ


รูปที่ หน้า

2.1 แสดงหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่างๆ ....6

2.2 ตัวอย่างโครงสร้างรับแรงดึง ....7

2.3 เส้นโค้งแสดงความสามารถรับน้ำหนักของเสา (Column Strength Curve)....8

2.4 แสดงระยะการโก่งตัวทางข้างของเสาโดยมีฐานรองรับยึดหมุน บน ล่าง....9

2.5 แสดงค่าตัวประกอบความยาวประสิทธิผลของแต่ละ การยึดรั้ง บน ล่าง แต่ละประเภท....13

2.6 การเสียรูปจากชิ้นส่วนที่ถูกอัด ....18

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $P$ และ$\delta$ ....18

2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $P$ และ$\delta$ ....18

2.9 ตัวอย่างโครงถักจำลอง....20

2.10 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่าง....21

2.11 ประเภทของตัวอย่างของโครงถักที่ทดสอบ....22

2.12 การโก่งเดาะของชิ้นส่วนในรูปการทดสอบ A....22

2.13 การโก่งเดาะของชิ้นส่วนในรูปการทดสอบ C ....23

2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งตัวของการทดสอบแบบ B....23

2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งตัวของการทดสอบแบบ C....24

2.16 ตัวอย่างภาพการทดสอบจริงของการทดสอบ A ....24

2.17 ตัวอย่างภาพการทดสอบจริงของการทดสอบ C ....25

2.18 ตัวอย่างภาพการทดสอบจริงของการทดสอบ E....25

2.19 ประเภทของตัวอย่างของโครงถักที่ทดสอบ....26

2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งตัวของการทดสอบS1 และ S3....27

2.21 ตัวอย่างรูปแบบการโก่งเดาะตามการทดสอบ flexible lateral support ....27

2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งเดาะกับค่าความแข็งสปริงในแบบทดสอบต่างๆ....28

3.1 โครงถัก Pratt truss....30

3.2 โครงถัก Triangle howe ....30

3.3 โครงถัก Triangle fink....31

3.4 โครงถัก Pitch ....31

3.5 โครงถัก Hip ....31

3.6 โครงถัก Half hip....31

3.7 โครงถัก Stub end ....31


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.8 โครงถัก Foot bridge ....................................................................................31
3.9 ลักษณะค้ำยันของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ..................................................................33
3.10 โครงถัก Pratt truss และระยะ L..........................................................................33
3.11 โครงถัก Triangle howe และระยะ L .....................................................................33
3.12 โครงถัก Pitch และระยะ L....................................................................................33
3.13 โครงถัก Hip และระยะ L.......................................................................................34
3.14 โครงถัก Half hip และระยะ L เมื่อค้ำยันอยู่ไกลปลายตัดเหลี่ยม ...................................34
3.15 โครงถัก Half hip และระยะ L เมื่อค้ำยันอยู่ใกล้ปลายตัดเหลี่ยม ...................................34
3.16 โครงถัก Pratt truss และระยะ L..........................................................................34
3.17 โครงถัก Pitch และระยะ L....................................................................................35
3.18 โครงถัก Hip และระยะ L = L1 + L2 + L3................................................................35
3.19 โครงถัก Half hip และระยะ L = L1 + L2.................................................................35
3.20 โครงถัก Pratt truss และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN.............................................35
3.21 โครงถัก Triangle howe และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN. .......................................36
3.22 โครงถัก Pitch และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN ....................................................36
3.23 โครงถัก Hip และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN.......................................................36
3.24 โครงถัก Half hip และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN ...............................................36
3.25 ลักษณะค้ำยันของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในกรณีแรก.....................................................37
3.26 ลักษณะค้ำยันของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในกรณีสาม.....................................................38
3.27 แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำมาศึกษาในกรณีที่สี่ .........................................................38
3.28 ลักษณะความแตกต่างของ Nonlinear load-deflection curveและ Eigenvalue buckling curve.........................................................................................................39
3.29 รูปแบบการเสียรูปหรือภาพเคลื่อนไหวที่สอดคล้อง(Modal) – Mode shape 1 : Factor 0.23289......................................................................................................40
3.30 แรงตามแนวแกน จากชิ้นที่เป็นแรงอัดสูงสุด.................................................................41
5.1 ค้ำยันทางข้างของโครงถักชนิด Half hip .....................................................................62
5.2 เปรียบเทียบการเพิ่มช่องการถักของกรณีศึกษาที่หนึ่งกับกรณีศึกษาที่สี่ในรูปแบบโครงถักชนิด Pratt truss ...................................................................................................62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์โครงสร้างมาช่วยในการออกแบบ มีบทบาทอย่างมากซึ่งปัจจุบัน ความสามารถของโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง มีการพัฒนาไปมาก สามารถวิเคราะห์รายละเอียดและครอบคลุมหลายกรณีศึกษาได้ใกล้เคียงกับสมมุติฐานทางทฤษฎี โดยเฉพาะโครงสร้างเหล็ก โครงถักได้ถูกนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนของอาคารสิ่งก่อสร้าง โดยโครงถักแต่ละแบบถูกสร้างเพื่อให้ตรงกับรูปแบบการใช้งาน ดังนั้นรูปแบบโครงถักตามการใช้งานแต่ละแบบจึงเป็นรูปแบบเฉพาะไม่เหมือนกันอย่างสิ้นเชิง

ซึ่งค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลขึ้นกับลักษณะเฉพาะของโครงสร้างนั้นทั้งความยาวในช่วงที่ไม่มีการค้ำยันทางข้าง ขึ้นกับความแข็งแรงของโครงสร้างเองและรูปแบบของโครงสร้างนั้นเองโดยในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม SAP2000 หาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถักแต่ละแบบ

การศึกษาชิ้นนี้จะศึกษาถึงการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของตัวโครงสร้างนั้นเพื่อหาข้อเปรียบเทียบกรณีที่มีผลต่อค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลและสามารถใช้เป็นแนวทางในการป้องกันการโก่งเดาะทางข้างของแต่ละชนิดโครงถักนั้นหรือข้อสรุปของการเลือกใช้โครงสร้างโครงถักรูปแบบที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะทางข้างหรือการโก่งเดาะในทิศตั้งฉากกับแนวแรงของโครงถักในรูปแบบต่าง ๆ
2. เพื่อหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถักในรูปแบบต่างๆ ตามขอบเขตการศึกษาและเปรียบเทียบตามกรณีศึกษา

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. โครงถัก ที่มีขนาดความยาวช่วงพาดมาก มีโอกาสสามารถเกิดการโก่งเดาะทางข้างหรือการโก่งเดาะทิศตั้งฉากกับแนวแรงได้ง่าย
2. โครงถักที่มีจำนวนชิ้นส่วนถักภายในโครงถักมาก ส่งผลให้สามารถต้านทานการโก่งเดาะทางข้างหรือการโก่งเดาะทิศตั้งฉากกับแนวแรงเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 แนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย

การออกแบบโครงสร้างถักเหล็กส่วนใหญ่มักคำนึงถึงเฉพาะ การโก่งตัวตามทิศทางการรับแรง และมักละเลย การโก่งตัวในทิศตั้งฉากกับแนวแรง ซึ่งตามมาตรฐาน EURO code [5] กำหนดอัตราส่วนปลอดภัยของโครงถัก ไว้ประมาณ 0.9 ของโครงถักส่วนที่ไม่มีการค้ำยันทางข้าง ซึ่งไม่ได้กำหนดมาเป็นชนิดโครงถักรูปร่างใด ลักษณะการถักแบบไหน จึงเห็นว่า ตามมาตรฐานนี้ ยังมีข้อบ่งชี้บางประการ ไม่ครอบคลุม ซึ่งอาจทำให้ตามมาตรฐานนี้ ผลการออกแบบ ไม่เหมาะสม หรือ ไม่ประหยัดเท่าที่ควร ด้วยสมมุติฐานนี้จึงนำมาสู่การสร้างแบบจำลองโครงถัก ตามขอบเขตชนิดโครงถักที่นำมายกตัวอย่าง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จำลองขึ้นจากแบบโครงถักที่เป็นที่นิยมส่วนใหญ่ตามลักษณะการใช้งานทั่วไป เพื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมมติฐานที่ตั้งขึ้น และสรุปผลออกมาเป็นคุณสมบัติของโครงถักแต่ละชนิดตามขอบเขตการศึกษา

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. โครงถักชนิด Pratt truss, Howe truss
2. โครงถักชนิด Triangle Pratt
3. โครงถักชนิด Triangle Fink
4. โครงถักชนิด Pitch
5. โครงถักชนิด Hip
6. โครงถักชนิด Half hip
7. โครงถักชนิด Stub end
8. โครงถักชนิด Foot bridge

ทุกชนิดโครงถัก จะทดลองความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรตามลำดับโดยให้ความสูงของโครงถักมีค่าเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของความยาวระหว่างฐานทั้ง 4 ความยาวเช่นความยาวระหว่างฐาน7 เมตรจะสูง 70 เซนติเมตรความยาวระหว่างฐาน 12 เมตรจะสูง 1.2 เมตร เพื่อตรวจสอบผลที่ได้ว่าเมื่อมีระยะความยาวระหว่างฐานเพิ่มขึ้นผลที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกันหรือไม่เพื่อทำให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขอบเขตการศึกษา

1. กรณีแรกการบังคับให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะในทิศทางด้านข้างอย่างเห็นได้ชัดโดยให้ใส่ค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างฐานของโครงถักทั้ง 8 ชนิดและทำการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลที่เกิดขึ้น
2. กรณีที่สอง การบังคับให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะในทิศทางด้านข้างอย่างเห็นได้ชัดโดยให้ใส่ค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างฐานของโครงถักทั้ง 8 ชนิดแต่เพิ่มขนาดหน้าตัดให้ใหญ่ขึ้นอาทิ เช่น จากชิ้นส่วนหลักขนาด 25x25x2 มิลลิเมตร เป็นขนาด 45x45x2 มิลลิเมตร และ ชิ้นส่วนย่อยจากขนาด20x20x2 มิลลิเมตร เป็นขนาด 40x40x2 มิลลิเมตร
3. กรณีที่สาม การบังคับให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะในทิศทางด้านข้างโดยไม่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างฐานของโครงถักทั้ง 8 ชนิดโดยใช้หน้าตัดชิ้นส่วนหลัก 25x25x2 มิลลิเมตรและชิ้นส่วนย่อยหน้าตัด 20x20x2 มิลลิเมตร
4. กรณีที่สี่ การบังคับให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะในทิศทางด้านข้างโดยให้ใส่ค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างฐานของโครงถักทั้ง 8 ชนิด แต่เพิ่มจำนวนชิ้นส่วนย่อยภายใน แต่ระยะความยาวระหว่างฐานโดยรวมเท่าเดิมทั้งความยาว 7 เมตร, 8 เมตร, 10 เมตร, 12 เมตร ให้โครงถักมีความถี่ของชิ้นถักชิ้นส่วนย่อยมากขึ้น

**ตารางที่ 1.1** รายละเอียดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ ตามขอบเขตการศึกษานี้

| ขนาดหน้าตัด (mm) | พื้นที่หน้าตัด ($cm^2$) | โมเมนต์อินเนอร์เชียร์ $I_y$, $I_z$($cm^4$) | ความหนา (mm) | โมดูลัสยัง E ($N/cm^2$) | พลาสติกโมดูลัสของหน้าตัด $S_y$, $S_z$($cm^3$) | รัศมีใจเรชัน $R_y$, $r_z$ (cm) | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25x25x2 | 1.840 | 1.635 | 2.000 | $208x10^5$ | 1.308 | 0.942 | ชิ้นส่วนหลัก |
| 45x45x2 | 3.440 | 10.620 | 2.000 | $208x10^5$ | 4.722 | 1.760 | ชิ้นส่วนหลัก |
| 20x20x2 | 1.440 | 0.787 | 2.000 | $208x10^5$ | 0.787 | 0.739 | ชิ้นส่วนย่อย |
| 40x40x2 | 3.040 | 7.337 | 2.000 | $208x10^5$ | 3.668 | 1.550 | ชิ้นส่วนย่อย |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

1. กำหนดกรณีศึกษา ของโครงถักทั้งหมด กำหนดแรงกระทำ ตำแหน่งกระทำ และทิศทางแรงกระทำ
2. สร้างแบบจำลองโครงถักในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ตามระยะความยาวต่างๆ และตามกรณีศึกษา
3. นำผลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ มาแทนค่าในสมการออย์เลอร์(Euler critical load,1757) [1] นำมาประยุกต์ใช้กับการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถัก
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ตามกรณีศึกษา และเปรียบเทียบผลการทดลองตามลักษณะกรณีศึกษา

## 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประมาณค่าการโก่งตัวในทิศตั้งฉากกับแนวแรงได้ถูกต้องเหมาะสมมากขึ้นตามลักษณะชนิดโครงถักนั้นๆ
2. เป็นแนวทางในการออกแบบโครงถักและโครงถักค้ำยันทางข้างขององค์อาคาร
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงถัก ให้เหมาะสม และประหยัดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 กล่าวนำ

ปกติ ส่วนต่างๆของโครงสร้าง จะรับทั้งแรงในแนวแกน (แรงดึง หรือแรงอัด) และโมเมนต์ดัดร่วมกันเสมอ เช่น ชิ้นส่วนของโครงข้อหมุน (Truss) ทั้งที่อยู่ในแนวนอนหรือใน แนวเอียง ที่สมมุติให้มีเฉพาะแรงในแนวแกนกระทำเพียงอย่างเดียว ชิ้นส่วนต่างๆจะรับโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดจากน้ำหนักของส่วนโครงสร้างเองด้วย เพียงแต่ในการคำนวณและออกแบบมิได้นำผลของโมเมนต์ดัดมาพิจารณาเพราะถือว่าโมเมนต์ดัดที่กระทำมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงตามแนวแกนที่กระทำ เช่นเดียวกับการพิจารณาออกแบบคานที่อาจมีแรงในแนวแกนกระทำอยู่บ้าง แต่ถือว่ามีค่าน้อยเมื่อเทียบโมเมนต์ดัดที่กระทำ เป็นต้น อย่างไรก็ดี แม้ว่าจะไม่ได้นำผลกระทบดังกล่าวมารวมพิจารณาในการออกแบบ แต่ถ้าสังเกตจากข้อกำหนดมาตรฐานจะพบว่ามาตรฐานของการออกแบบได้พิจารณาเผื่อผลกระทบนั้นๆไว้ด้วยแล้ว เช่น การจำกัดค่าของอัตราส่วนความชะลูดของส่วนโครงสร้างแต่ละประเภท เพื่อให้ใช้รูปตัดแต่ละส่วนของโครงสร้างที่มีโมเมนต์อินเนอร์เชียหรือสติฟเนสมากพอ เป็นต้น

## 2.2 โครงสร้างส่วนรับแรงดึง

### 2.2.1 เกี่ยวกับโครงสร้างรับแรงดึง

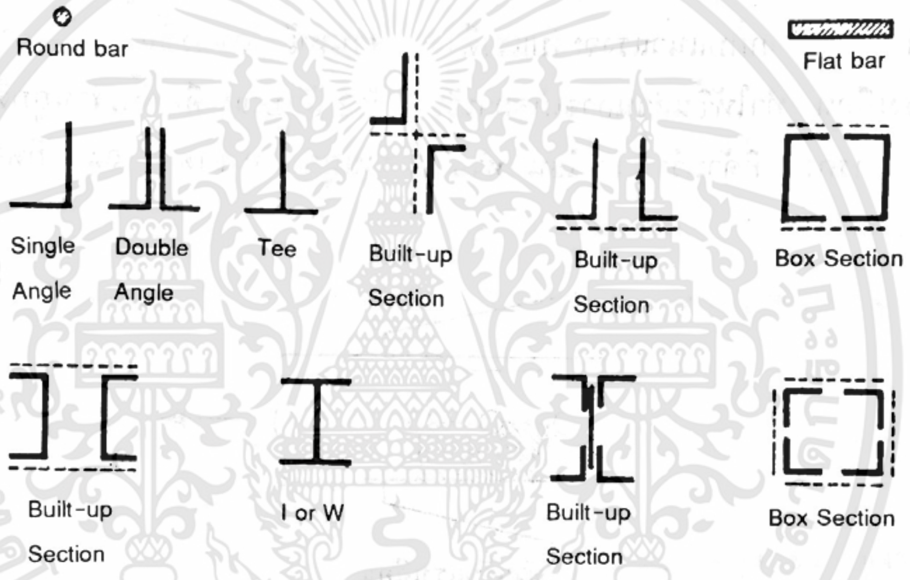
โครงสร้างรับแรงดึงเป็นส่วนของโครงสร้างที่รับแรงดึงตรงปลายทั้งสองข้าง โดยกระทำผ่านศูนย์ถ่วงของรูปตัด พบทั่วไปในชิ้นส่วนของโครงสะพาน โครงหลังคาหอสูงค้ำยัน ระบบเคเบิ้ลและในกรณีที่ใช้เป็นเหล็กยึด (tie rod) การออกแบบหน้าตัดของโครงสร้างส่วนที่รับแรงดึงนั้นค่อนข้างง่าย เนื่องจากไม่ต้องระวังเรื่องการโค้งโก่งงอ (buckling) ที่จะทำให้ชิ้นส่วนไร้ความมีเสถียรภาพ (stability) แต่ต้องพิจารณาเกี่ยวกับการทำรอยต่อที่ปลายของส่วนโครงสร้าง

ถ้าให้ $P$ เป็นแรงดึงทั้งหมดที่กระทำตั้งฉากบนรูปดัดที่มีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ $A$ และสมมุติให้หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเท่ากับ $F$ แผ่กระจายสม่ำเสมอตลอดเนื้อที่หน้าตัดนั้น ดังนั้นหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น $F = P/A$ หรือแรงดึงที่ส่วนโครงสร้างรับได้ $P = FA$ ในเมื่อ $F$ เป็นแรงหรือหน่วยแรงดึงที่ส่วนโครงสร้างรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นสมการที่จะนำไปใช้พิจารณาออกแบบ หาเนื้อที่หน้าตัดของโครงสร้างส่วนที่รับแรงดึงต่อไปเมื่อทราบหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ หรือ กำลังรับแรงดึงประลัย ที่กำหนดให้ในแต่ละวิธีของการออกแบบ

อนึ่ง การคำนวณออกแบบโครงสร้างส่วนรับแรงดึง มักพิจารณาร่วมกันกับการออกแบบทำรอยต่อที่ปลายชิ้นส่วน ซึ่งอาจต่อโดยใช้การเชื่อมหรือโดยใช้ยึด หากทราบเกี่ยวกับลักษณะของการต่อปลาย จะช่วยให้การออกแบบและเลือกใช้ส่วนโครงสร้างที่รับแรงดึงง่ายขึ้น




**รูปที่ 2.1** แสดงหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่างๆ [3]

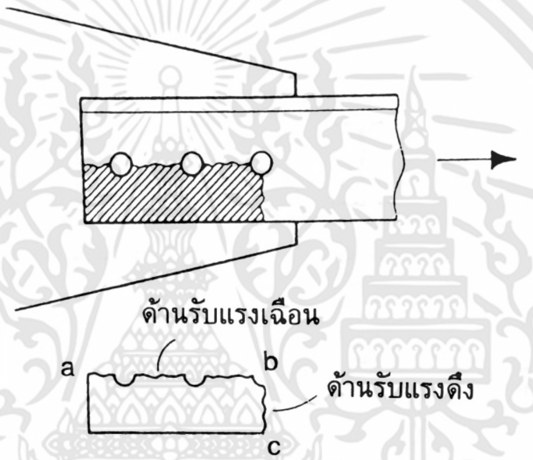
## 2.2.2 ลักษณะการวิบัติของโครงสร้างส่วนรับแรงดึง

โดยทั่วไป การวิบัติหรือชำรุดเสียหายของโครงสร้างส่วนที่รับดึง (เมื่อไม่คิดการวิบัติที่ตัวยึดต่อหรือที่รอยเชื่อต่อ) อาจเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะ ดังต่อไปนี้ คือ

1. จากการคราก (yielding) เนื่องจากแรงดึงที่กระทำบนหน้าตัดทั้งหมด (gross area : $A_g$) ของชิ้นส่วนมีค่าสูงมาก เกินกว่ากำลังที่จุดครากของเหล็ก $F_y$ ทำให้ชิ้นส่วนถูกดึงยืดออกจนทำให้โครงสร้างโดยรวมเสียรูปร่างไป ป้องกันได้โดยเปลี่ยนใช้ขนาดรูปตัดใหญ่ขึ้นหรือเปลี่ยนใช้เหล็กที่มีกำลังจุดครากสูงขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้หน่วยแรงดึงที่กระทำมีค่าไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากการฉีกขาด (fracture) เนื่องจากแรงดึงที่กระทำตรงหน้าตัดที่มีรูเจาะเพื่อทำรอยต่อหรือที่เรียกว่า หน้าตัดสุทธิ (net area : $A_n$) ซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดน้อยกว่าหน้าตัดทั้งหมด ดังนั้น หน่วยแรงดึงที่กระทำตรงหน้าตัดสุทธิจึงมีค่าสูงมากกว่าปกติและเมื่อมีค่าสูงกว่ากำลังต้านทานแรงดึง (minimum tensile strength :$F_u$) ของเหล็กชิ้นส่วนจะฉีกขาดออกจากกันป้องกันได้โดยการจัดระยะห่างระหว่างรูเจาะและระยะห่างที่ปลายชิ้นส่วนให้มีค่ามากขึ้นเพื่อให้ได้เนื้อที่หน้าตัดสุทธิมากขึ้นซึ่งเป็นการลดค่าหน่วยแรดึงมิให้เกินกว่าหน่วยแรงดึงที่กำหนดหรือเปลี่ยนใช้เหล็กที่มีกำลังต้านทานแรงดึงสูงขึ้น




**รูปที่ 2.2** ตัวอย่างโครงสร้างรับแรงดึง [3]

## 2.3 โครงสร้างส่วนรับแรงอัด

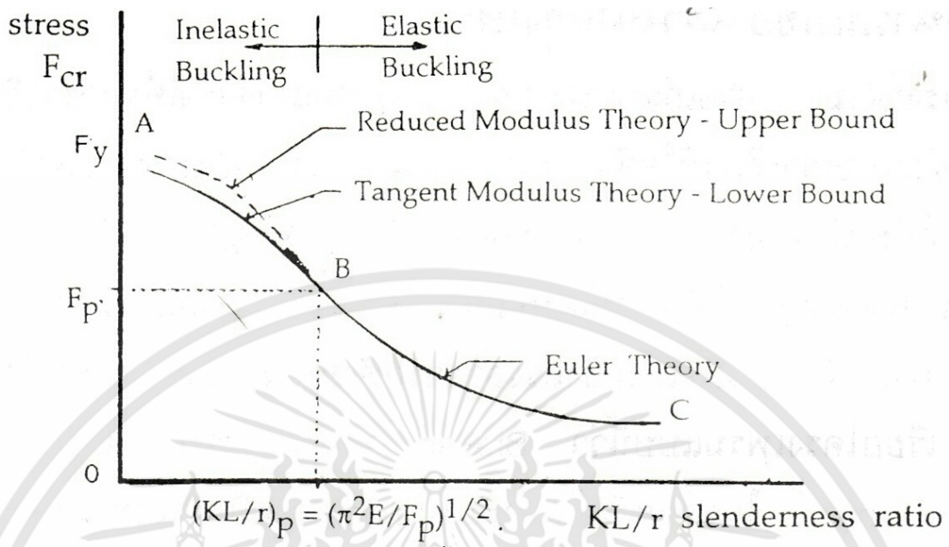
จากการพิจารณาหากำลังรับน้ำหนักของเสาที่มีความยาวต่างๆกัน ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดวิกฤต $F_{cr}$ กับอัตราส่วนความชะลูดของเสา $KL/r$ ดังรูปที่ 2.3 ส่วนโค้ง BC แสดงหน่วยแรงอัดวิกฤตเมื่อเสาโก่งเดาะในช่วงอิลาสติก ซึ่งเป็นไปตามสมการของออยเลอร์เมื่ออัตราส่วนความชะลูดเท่ากับหรือเกินกว่า ดังสมการ (2.1)

$$\sqrt{\frac{\pi^2 E}{F_p}} \tag{2.1}$$

ส่วนโค้ง AB แสดงหน่วยแรงอัดวิกฤตเมื่อเสาโก่งเดาะในช่วงอินอิลาสติก ซึ่งเป็นไปตามสมการที่เสนอโดย Engesser [3] เมื่ออัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่า ตามสมการที่ (2.1) เมื่อวัดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป จะเห็นว่าทฤษฎีโมดูลัสลด [3] ให้ค่าพิกัดบน (Upper limit)ส่วนทฤษฎี โมดูลัสสัมผัส [3] ให้ค่าพิกัดล่าง(lower limit)

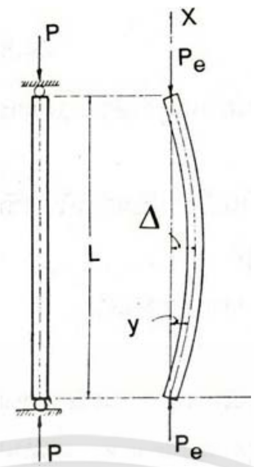



**รูปที่ 2.3** เส้นโค้งแสดงความสามารถรับน้ำหนักของเสา (Column Strength Curve) [3]

## 2.4 กำลังรับน้ำหนักของเสาเดี่ยว

น้ำหนักวิกฤตของเสายาวหรือน้ำหนักของออยเลอร์ (Euler critical load ) เมื่อปี 1757Leonhard Euler [3] ได้เสนอวิธีพิจารณาหากำลังรับน้ำหนักของเสาโดยสมมุติว่า เสามีแนวตรงและรับน้ำหนักหรือแรงอัดตามแนวแกนไม่เยื้องศูนย์ (axially loaded column) เสานี้มีหน้าตัดสม่ำเสมอและทำด้วยวัสดุเนื้อเดียวกันตลอดความยาวเสาที่ปลายทั้งสองข้างของเสามีที่รองรับแบบยึดหยุ่น (pin-ended) ถ้าให้ E เป็นโมดุลัสยืดหยุ่น ( elastic modulus) ของวัสดุ $I$ เป็นโมเมณต์อินเนอร์เชีย ( moment of inertia ) ของรูปตัดรอบแกนที่รับโมเมนต์ดัดและ $L$ เป็นความยาวของเสา การวิเคราะห์แบบอินลาสติกเพื่อหาน้ำหนักวิกฤต $P_e$ ที่ทำให้เสาเกิดการโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัดทำได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.4 แสดงระยะการโก่งตัวทางข้างของเสาโดยมีฐานรองรับยึดหมุน บน ล่าง [3]

ตั้งแกน X และ Y ดังรูปที่ 2.4 เมื่อเสารับน้ำหนักถึง $P_e$ สมมุติให้เสาโก่งตัวดังรูปที่ 2.4

$$EI\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right) = -P_e y \tag{2.2}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P_e y}{EI} = 0 \tag{2.3}$$

$$k^2 = \frac{P_e}{EI} \tag{2.4}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2 y = 0 \tag{2.5}$$

ทำการแก้สมการโดยสมมุติให้คำตอบเป็น

$$y = e^{mx} \tag{2.6}$$

เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการ (2.5) จะได้

$$m = \pm ik \tag{2.7}$$

นั้นคือ

$$y = C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จากความสัมพันธ์

$$e^{ikx} = cos\,kx \pm sin\,kx \tag{2.9}$$

จะได้

$$y = A\,sin\,kx + B\,cos\,kx \tag{2.10}$$

ซึ่ง A และ B เป็นตัวคงที่ ที่ต้องหาจากเงื่อนไขของรูป คือ (ก) ที่ระยะ $x = 0$ ค่าของ $y = 0$ และ (ข) ที่ระยะ $x = l$ ค่าของ $y = 0$ แทนค่าจากเงื่อนไข (ก) ลงในสมการ (2.10) จะได้ $B = 0$

$$y = A\,sin\,kx \tag{2.11}$$

จากเขื่อนไข (ข) จะได้

$$A\,sin\,kL = 0 \qquad (2.11)$$

ซึ่งความสัมพันธ์นี้อาจจะได้ $A = 0$ หรือ

$$sinkL = 0 \tag{2.12}$$

ซึ่งต้องพิจารณาดังนี้ ถ้า $A = 0$ แสดงว่า เมื่อเสารับน้ำหนักเสานี้ไม่มีการโก่งเลย(ซึ่งเป็นไปไม่ได้)ดังนั้น ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งจะได้ว่า $kL = n\pi$ (ในเมื่อ n = 1,2,3,....) แต่จากที่สมมุติให้

$$k^2 = \frac{P_e}{EI} \tag{2.13}$$

ดังนั้น น้ำหนักวิกฤต

$$P_e = \frac{n^2\pi^2 EI}{L^2} \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าการโก่งงอของเสา

$$y = A\,sin\frac{n\pi x}{L} \tag{2.15}$$

จากสมการ (2.14) จะเห็นว่าน้ำหนักน้อยที่สุดที่ทำให้เสาเกิดการโก่งเดาะเมื่อค่าของ n เท่ากับหนึ่ง นั้นคือ น้ำหนักวิกฤต

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{2.16}$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการของออยเลอร์ (Euler) [3] น้ำหนักวิกฤตที่ได้จากสมการนี้เรียกว่า น้ำหนักของออยเลอร์ (Enler load ) [3] ถ้าเสามีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ $A$ และเนื่องจาก

$$I = Ar^2 \tag{2.17}$$

ในเมื่อ r เป็นรัศมีไจเรชัน ดังนั้น หน่วยแรงอัดวิกฤตเฉลี่ย

$$\frac{P_e}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \tag{2.18}$$

ค่าของ $L/r$ เรียกว่า อัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) ของเสา

จากค่าของน้ำหนักวิกฤตที่ได้ จะเห็นว่าเมื่อเสามีความยาวเท่ากัน กำลังรับน้ำหนักของเสาขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงของวัสดุ $(EI)$ และถ้าใช้วัสดุอย่างเดียวกัน จะเห็นว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของโมเมนต์อินเนอร์เชียร์ $(I)$ ของรูปตัด

โดยทั่วไปรูปตัดของเสาเหล็กรูปพรรณมีค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียรอบแกนที่ตั้งฉากกันสองค่า คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียรอบแกนหลัก x เรียกว่า $I_x$ ซึ่งมีค่ามากและรอบแกนรอง y ซึ่งเรียกว่า $I_y$ ซึ่งมีค่าน้อย ดังนั้น เสาที่ถูกยึดปลายทั้งสองข้างการโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัดจะเกิดรอบแกน y เสมอ เพราะมีค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียน้อยที่สุดนั้นคือกำลังรับน้ำหนักของเสาจะเท่ากับ

$$\frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่หากทำค้ำยันระหว่างช่วงเสาในทิศที่ตั้งฉากกับแกน y ซึ่งเป็นการลดช่วงความยาวของการโก่งเดาะทางแกน y ให้น้อยลง กำลังรับน้ำหนักของเสาก็จะเพิ่มมากขึ้นฉะนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกระยะค้ำยันที่เหมาะสมที่จะทำให้กำลังรับน้ำหนักทั้งสองแกน (แกน x และแกน y ) มีค่าเท่ากันได้

จากการทดลองพบว่าสมการของออยเลอร์ให้ค่าคาดหมายกำลังรับน้ำหนักของเสาได้เฉพาะเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดมากๆ (หรือเสายาวนั่นเอง) และเป็นการโก่งเดาะในช่วงอิลาสติกทั้งสิ้นโดยมีหน่วยแรงอัดวิกฤตที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเสาไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดพิกัดยืดหยุ่นของวัสดุ

ถ้าให้ $F_p$ เป็นหน่วยแรงที่ขีดพิกัดยืดหยุ่นของวัสดุดังนั้นจะได้พิกัดต่ำสุดของอัตราส่วนความชะลูดที่เสาจะเกิดการโก่งเดาะในช่วงอิลาสติกคือ

$$(L/r)_p = \sqrt{\pi^2 E/F_p} \tag{2.20}$$

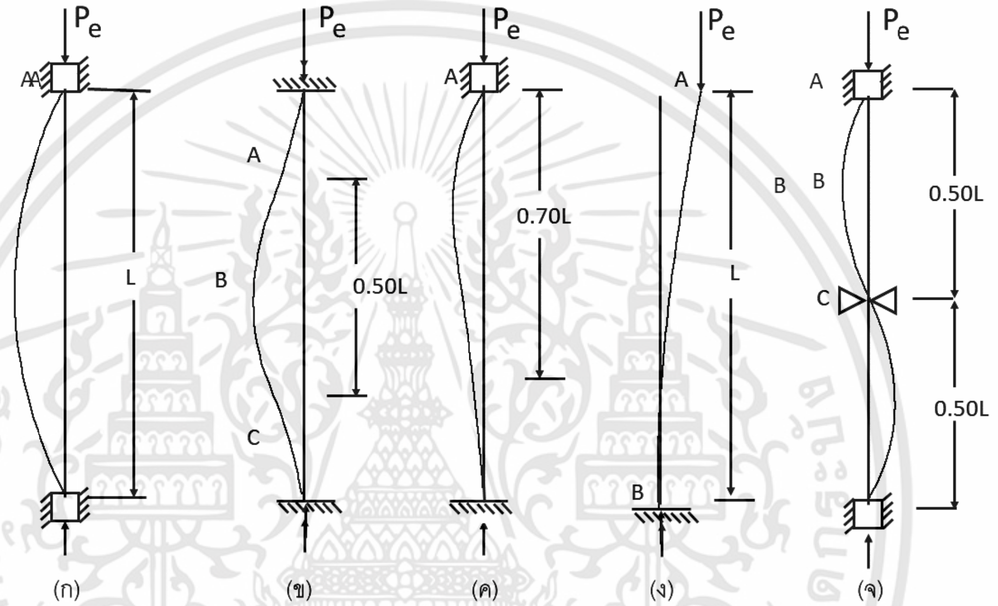
นั้นคือเมื่อเสามีอัตราส่วนความชะลูดเกินกว่าค่านี้ เสาจะโก่งเดาะในช่วงอิลาสติกหรือในทำนองกลับกันเมื่อเสามีอัตราส่วนความชะลูดต่ำกว่าค่านี้ เสาจะโก่งเดาะในช่วงอินอิลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ผลของการยึดปลายเสาที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักของเสา

กำลังรับน้ำหนักของเสายาวที่มีสภาพการยึดปลายเสาต่างๆกันสามารถหาได้ตามวิธีการวิเคราะห์ของ Leonhard Euler [3] ดังกล่าวข้างต้นรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการยึดปลายเสาแบบต่างๆในโครงสร้างทั่วไป น้ำหนักวิกฤตของเสายาวในแต่ละแบบหาได้ดังนี้

1. เมื่อปลายเสาเป็นแบบยึดหมุนทั้งสองปลาย ดังรูปที่ 2.5 (ก) น้ำหนักวิกฤตของเสาแบบนี้หาได้โดยใช้สมการของออยเลอร์ดังกล่าวข้างต้น




**รูปที่ 2.5** แสดงค่าตัวประกอบความยาวประสิทธิผลของแต่ละ การยึดรั้ง บน ล่าง แต่ละประเภท [3]

2. เมื่อปลายเสาเป็นแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง ดังรูปที่ 2.5 (ข) จุดดัดกลับ A และ C จะอยู่ห่างจากปลายทั้งสองเป็นระยะ $L/4$ ดังนั้นส่วนของเสา ABC จะคล้ายกับเสาในแบบแรกซึ่งมีความยาวเสาเป็น $L/2$ ดังนั้น น้ำหนักวิกฤตของเสา

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(\frac{L}{2})^2} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \tag{2.21}$$

นั้นคือเมื่อปลายเสาเป็นแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง กำลังรับน้ำหนักของเสาจะเป็นสีเท่าของเสาที่มีปลายทั้งสองข้างเป็นแบบยึดหมุน กำลังรับน้ำหนักของเสาที่หาได้นี้สามารถนำไปใช้ได้กับรูปที่ 2.5 (จ) ซึ่งมีปลายทั้งสองข้างเป็นแบบยึดหมุนและมีการยึดหรือค้ำยันทางด้านข้างที่กึ่งกลางของเสาดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อปลายเสาข้างหนึ่งเป็นแบบยึดแน่น และปลายเสาอีกข้างหนึ่งเป็นแบบยึดหมุนดังรูปที่ 2.5 (ค) จุดดัดกลับ C จะอยู่ที่ระยะ $0.7L$ ห่างจากปลาย A และส่วนของเสา ABC จะคล้ายกับเสาในแบบแรก รูปที่ 2.5 (ก) ซึ่งมีความยาวของเสาเป็น $0.7L$ ดังนั้นน้ำหนักประลัยของเสา

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2} = \frac{2\pi^2 EI}{L^2} \tag{2.22}$$

นั่นคือ กำลังรับน้ำหนักของเสาแบบนี้จะเป็นสองเท่าของเสาในรูปที่ 2.5 (ก)

4. เมื่อปลายเสาข้างหนึ่งเป็นแบบยึดแน่นและปลายเสาอีกข้างหนึ่งเป็นแบบปล่อยอิสระดังรูปที่ 2.5 (ง) ส่วนของเสา AB ในรูปที่ 2.5 (ง) นี้จะเป็นส่วนของเสา AB ในรูปที่ 2.5 (ก) ดังนั้น น้ำหนักประลัยของเสาคือ

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(2L)^2} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \tag{2.23}$$

นั่นคือ กำลังรับน้ำหนักของเสาแบบนี้เหลือเพียงหนึ่งในสี่ของเสาในรูปที่ 2.5 (ก)

ดังนั้นสมการของ ออยเลอร์จึงเป็นสมการที่ใช้หาน้ำหนักวิกฤตของเสายาว เมื่อเสามีลักษณะการยึดปลายต่างๆกัน โดยเขียนเป็นสมการทั่วไปดังนี้คือสำหรับการโก่งเดาะในช่วงอิลาสติก

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{2.24}$$

ทำนองเดียวกัน สำหรับการโก่งเดาะในช่วงอินอิลาสติก ดังสมการที่ 2.24 โดยที่ $KL$ เป็นช่วงความยาวประสิทธิผล (Effective Length) ตามสภาพของการยึดปลายตัว $K$ เรียกว่าตัวประกอบความยาวประสิทธิผล (Effective Length factor) ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับการยึดปลายเสาในลักษณะหนึ่งๆ

ในปี ค.ศ. 1952 Bleich [3] ได้เสนอสมการอย่างง่ายที่ใช้คำนวณหาหน่วยแรงอัดวิกฤตเมื่อเสาโก่งเดาะในช่วงอินอิลาสติก โดยพิจารณาให้ส่วนโค้ง AB อยู่ในรูปสมการของโค้งพาราโบลาต่อไปนี้ซึ่งเป็นสมการที่ใช้กันต่อมาจนกระทั่งปัจจุบัน คือ

$$F_{cr} = F_y - \frac{Fy - Fp}{(KL/r)^2{}_p}\left(\frac{KL}{r}\right)^2 \tag{2.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้ หน่วยแรงที่ขีดพิกัดยืดหยุ่น $F_{\mathrm{p}}$เท่ากับ $F_y/2$ดังนั้นอัตราส่วนความชะลูด $(KL/r)_{\mathrm{p}}$ที่จำแนกว่าเสาโก่งเดาะในช่วงอิลาสติกหรืออินอิลาสติกตามสมการที่ (2.20) และตามสมการที่ (2.26)

$$\sqrt{2\pi^2 E/F_y} \tag{2.26}$$

ซึ่งสมมุติให้มีสัญลักษณ์

$$C_c = (KL/r)_{\mathrm{p}} \tag{2.27}$$

**ก. เมื่อเสามีอัตราส่วน**

$$KL/r > C_c \tag{2.28}$$

เสาโก่งเดาะในช่วงอิลาสติก โดยหน่วยแรงอัดวิกฤตมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \tag{2.29}$$

ซึ่งถ้าให้อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 12/23 จะได้หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในช่วงนี้เท่ากับ

$$\frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \tag{2.30}$$

**ข. เมื่อเสามีอัตราส่วน**

$$KL/r \leq C_c \tag{2.31}$$

เสาโก่งเดาะในช่วงอินอิลาสติกโดยหน่วยแรงอัดวิกฤตมีค่าเท่ากับ

$$F_y - \frac{\mathrm{Fy} - (\mathrm{Fy}/2)}{Cc^2}\left(\frac{KL}{r}\right) \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเท่ากับ

$$(1-\frac{1}{2}\left(\frac{KL/r}{Cc}\right)^2)F_y \tag{2.33}$$

ซึ่งถ้าให้อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ

$$\frac{5}{3}+\frac{3}{8}\left(\frac{KL/r}{Cc}\right)-\frac{1}{8}\left(\frac{KL/r}{Cc}\right)^3 \tag{2.34}$$

จะได้หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในช่วงนี้ เท่ากับ

$$\frac{1-\frac{1}{2}\left[\frac{KL/r}{Cc}\right]^2}{\frac{5}{3}+\frac{3}{8}\left[\frac{KL/r}{Cc}\right]-\frac{1}{8}\left[\frac{KL/r}{Cc}\right]^3} \tag{2.35}$$

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Experimental study of steel truss lateral–torsional buckling ซึ่งเขียนโดย Joanna Jankowska-Sandberg, JarosławKołodziej ตีพิมพ์จากวารสาร Engineering Structures 46 ปีที่พิมพี 2013หน้าที่ 165–172 [4]

### 2.6.1 บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้รวบรวมผลการทดลองที่เกี่ยวกับการโก่งตัวของโครงถักเหล็กที่หน้าตัด ชิ้นส่วนกลวงโดยแต่ละชิ้นส่วนเชื่อมกันอย่างยึดหยุ่น วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ได้วิเคราะห์และแสดงผลออกมาในเชิงตัวเลขและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการระยะการโก่งตัวระหว่างการโก่งตัวออกมาจากแนวระนาบจะอ้างอิงมาตรฐาน Eurocode 3 [5] จากที่กล่าวถึง Eurocode 3 [5] ได้กำหนดว่าระยะการโก่งตัวของโครงถักเหล็กที่มีหน้าตัดกลวงสามารถประมาณค่าการโกร่งตัวแนวนอกระนาบ (out-of-plane buckling) เท่ากับ 0.9L โดยที่ L คือระยะระหว่างฐานรองรับทั้งสองข้างหรือาจน้อยกว่าหากสามารถพิสูจน์ได้

บทความวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบต่อโครงถักในหลายปัจจัย เช่น ความยาวระห่างตัวยึดด้านข้าง, ตัวยึดที่เป็นแบบแข็ง และ ตำแหน่งของน้ำหนักที่กระทำ เป็นต้น การศึกษานี้ได้แสดงถึงค่าของน้ำหนักวิกฤตซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความแข็ง และระยะของการยึดด้านข้างของโครงถักที่ถูกกด นอกจากนั้นยังแสดงการประมาณค่าของระยะการโก่งสำหรับโครงถักที่ถูกกดซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.9L โดยมีการตรวจสอบทั้งการยึดด้านข้างแบบแข็งและยึดหยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 บทนำ

การโก่งตัวด้านข้าง (The lateral-torsional buckling) อาจถูกเรียกว่าการเสียรูปของคานโดยปรากฏการณ์ทำให้คานเริ่มมีความแข็งน้อยลง ถูกกระทำทั้งแรงแอ่นตัวและแรงบิด ทั้งสองเรื่องนี้ใกล้เคียงกันคือ การโก่งตัวของคาน และ การโก่งตัวของโครงถัก แต่ว่าการวิเคราะห์การโก่งตัวของคานมีความสำคัญกว่าเพราะว่าโครงถักมีขนาดที่กำหนดตายตัว แต่ในเมื่อหลายๆปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ถ้าสร้างโครงถักตามมาตรฐานที่ทำตามๆกันมา จะพบว่ามันเป็นการออกแบบที่สิ้นเปลืองโดยใช่เหตุ และ ไม่เป็นผลดีต่อเศรษฐกิจ ซึ่งเอกสารงานวิจัยได้อธิบายเกี่ยวกับการโก่งตัวของโครงถัก ที่เกี่ยวข้องกับหลายๆกรณี เช่น การตรวจสอบความเกี่ยวข้องระหว่างค่าน้ำหนักวิกฤต (Critical Load) กับ ความเสถียรภาพของโครงสร้างโครงถักที่ต้องรองรับ ในปัจจุบันมีปัญหามากมายที่เกี่ยวข้องกับความเสถียรภาพของโครงถักซึ่งถูกนำมาวิจัยในหลายๆ ศูนย์วิจัย แต่อย่างไรก็ตามจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังมีอยู่น้อยมาก

บทความนี้เกี่ยวข้องกับทฤษฎีและการทดลองของการโก่งตัวแบบยืดหยุ่นของโครงถักเหล็ก การศึกษานี้ได้สนใจหลายๆปัจจัยของการศึกษาค่าน้ำหนักวิกฤตเช่น ชนิดของวิธีการวางน้ำหนัก ความสัมพันธ์ระหว่างคอร์ดกับความแข็งของ หรือ ความห่างของระยะคอร์ด จากที่สนใจปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ผู้เขียนได้ผลการทดลองนำมาตรวจสอบบทความวิจัยนี้ได้รวบรวม ผลการทดลองที่คัดสรรมาเกี่ยวกับการโก่งตัวของโครงถักที่มีชิ้นส่วนและการยึดด้านข้าง ในความคิดของผู้เขียนเชื่อว่างานวิจัยนี้จะทำให้การออกแบบสร้างโครงถักสามารถทำได้อย่างคุ้มค่า และยังเป็นผลดีต่อเศรษฐกิจด้วย

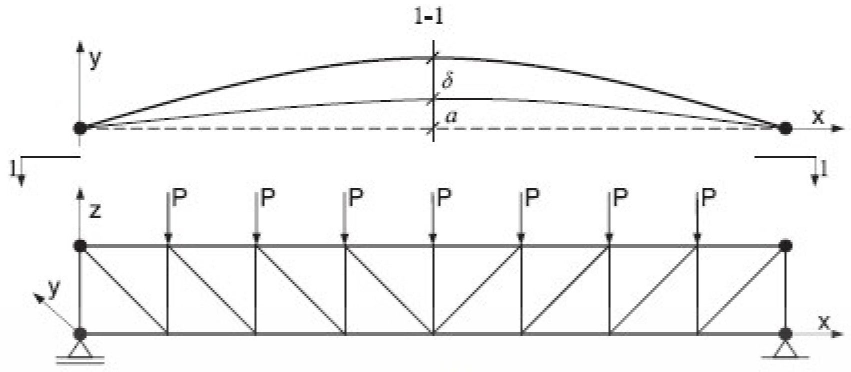
## 2.6.3 การทดลอง

### 2.6.3.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการทดลองคือตรวจสอบค่าน้ำหนักวิกฤตในโครงถักอุดมคติ เพราะว่าระยะการโก่งตัวของโครงถักที่ถูกกดตรวจสอบได้โดยใช้ความรู้เรื่องน้ำหนักตรวจสอบค่าน้ำหนักวิกฤตของโครงถักจริง โดยใส่น้ำหนักจนกว่าจะเกิดการโก่งตัว มัน ยากที่จะได้ตามเป้าหมายเพราะว่าเป็นไปไม่ได้สำหรับโครงสร้างที่สมบูรณ์แบบ ดังนั้นจึงใช้วิธีโดยอ้อมคือการวัดค่าการเคลื่อนที่ของข้อต่อตามแนวแกนตามแนวนอนระหว่างการใส่น้ำหนัก การใส่น้ำหนักอาจมีค่าน้อยกว่าค่าน้ำหนักวิกฤตเพราะว่ามันจะไม่ทำให้แบบจำลองเกิดความเสียหายมันถูกคาดคะเนว่าค่าของความโค้งของโครงถักที่ถูกกด คือระยะ a มีรูปร่างเป็นแบบกราฟ $sin$ ( รูป2.6) การแอ่นตัวเพิ่มค่า โดยการกระทำที่ข้อต่อด้วยแรง P สามารถแสดงด้วยรูปแบบสมการ ดังนี้

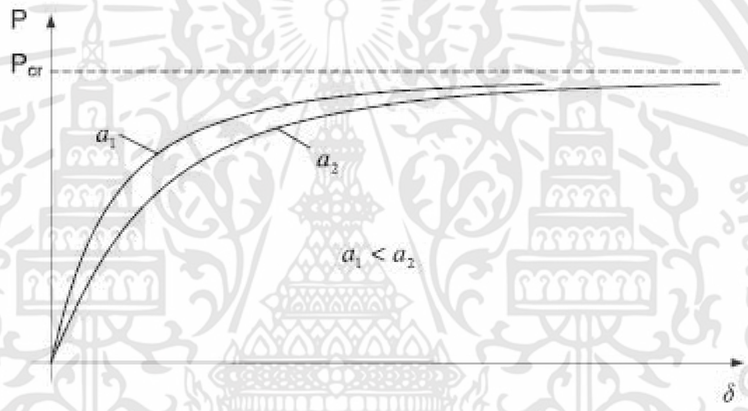
$$\delta = \frac{a}{\frac{P_{cr}}{P} - 1} \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

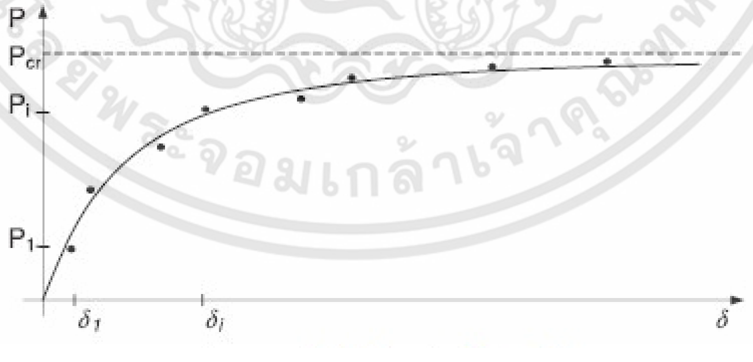



**รูปที่** 2.6 การเสียรูปจากชิ้นส่วนที่ถูกอัด [4]

ใน $P_{cr}$คือน้ำหนักวิกฤตของโครงถัก ถูกแสดงดังรูป 2.7




**รูปที่ 2.7** ความสัมพันธ์ระหว่าง $P$ และδ  [4]




**รูปที่ 2.8** ความสัมพันธ์ระหว่าง $P$ และ δ [4]

แต่ละการทดลองของโครงถักได้ทำการตรวจสอบค่าลำดับ (รูป 2.8) และใช้วิธีเซาท์เวลล์ (Southwell's method) ประมาณเส้นโค้งของกราฟ เช่น ค่าน้ำหนักวิกฤต $P_{cr}$ โดยที่ค่าที่ได้เป็นค่าน้ำหนักวิกฤตในอุดมคติและไม่ได้นำความรู้เก่ามาตรวจสอบค่านี้ เพราะว่าจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้การวัดค่าการเคลื่อนที่ตาม (รูปที่ 2.6) และค่า δ จากสมการที่ (2.34) และ (รูปที่2.7) โดยรู้ว่าค่า $P_{cr}$สามารถตรวจสอบแรงสูงสุด$N_{cr}$ในชิ้นส่วนที่ถูกกดอัด และ ความยาวของการโก่งตัว $L_{cr}$, ตาม สมการด้านล่างนี้

$$L_{\mathrm{cr}} = \pi\sqrt{\frac{EI}{N_{cr}}} \tag{2.35}$$

เมื่อ $EI$เป็นค่าคุณสมบัติของชิ้นส่วนของการโก่งตัวนอกระนาบ (Out-of-plane buckling)

### 2.6.3.2 รายละเอียดแบบจำลอง

การทดสอบนี้ใช้แบบจำลอง 1:1 ทุกชิ้นส่วนทำจากเหล็กกล่องหล่อเย็น หน้าตัดสี่เหลี่ยม จัตุรัสรายละเอียดชิ้นส่วนต่างๆ จะอยู่ใน (รูปที่ 2.9) ข้อต่อเชื่อมกันโดยไม่มีข้อต่อที่ผิดปกติตามโปรแกรมที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย

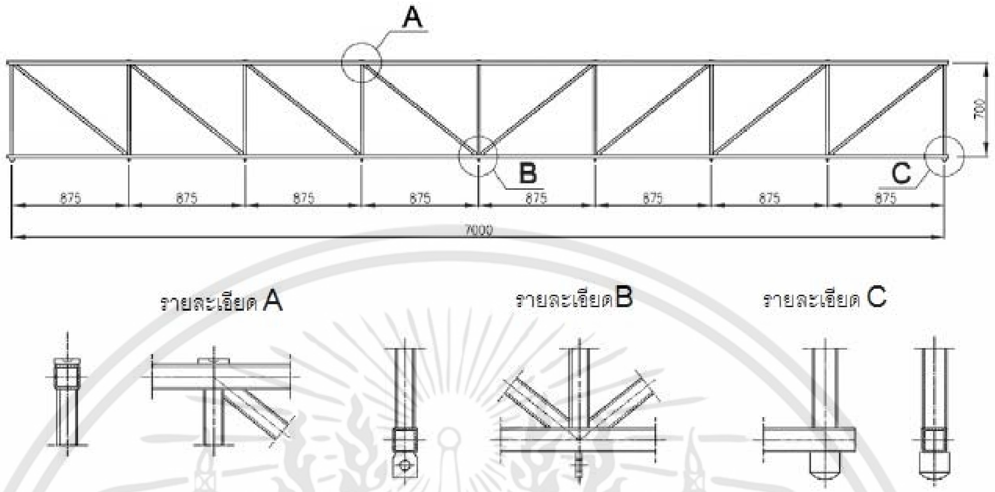
1. รายละเอียดของชิ้นส่วนของคอร์ดและฐานรองรับ 25 x 25 x 2 เหล็กกล่อง ( A = 1.927 $cm^2$ , $I_y = I_z$ = 1.618 $cm^4$ , $I_x$ = 2.843 $cm^4$ , t = 2.259 mm , E = 208.07 GPa , G = 80.02 GPa)

2. รายละเอียดของชิ้นส่วนตรงกลาง 20 x 20 x 2 เหล็กกล่อง ( A = 1.608 $cm^2$ , $I_y = I_z$ = 0.849$cm^4$ , $I_x$ = 1.354 $cm^4$ , t = 2.315 mm , E = 210.83 GPa , G = 81.09GPa)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3.3 รายละเอียดการทดสอบ

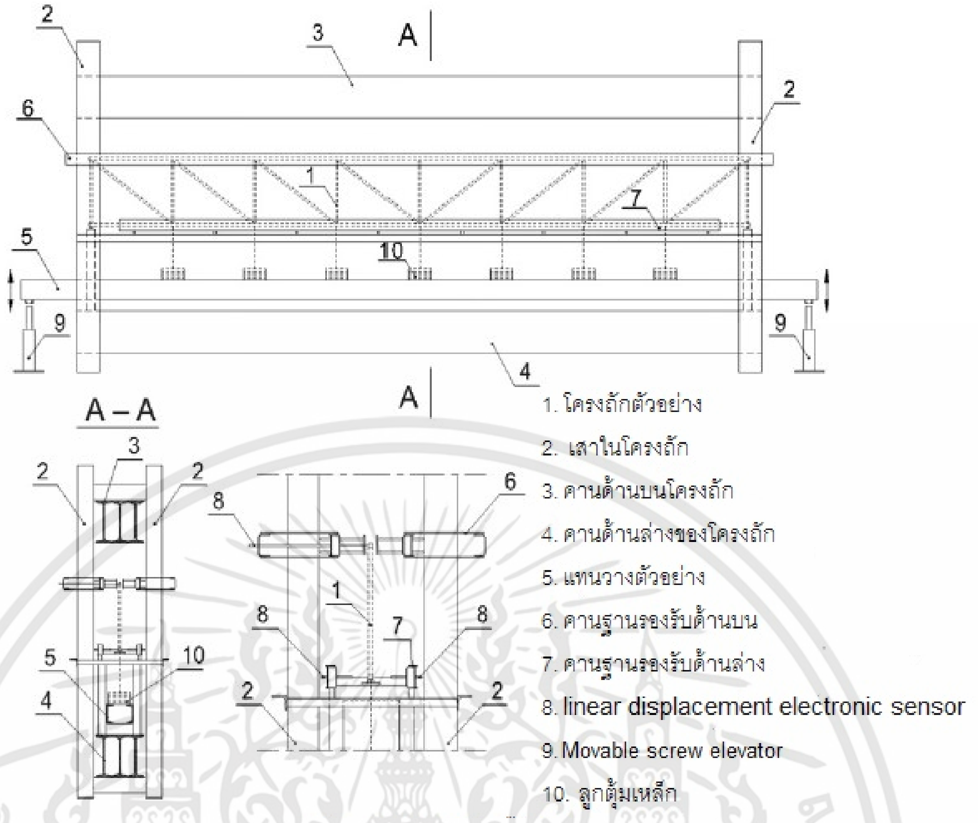
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่จัดทำขึ้นมาโดยเฉพาะแสดงในรูปที่ 2.10




**รูปที่ 2.9** ตัวอย่างโครงถักจำลอง [4]

การทดสอบโก่งเดาะของโครงถัก จุดค้ำยันทางข้างเป็นแบบยึดแน่น บนและล่างคานรองรับโครงถักจะติดจุดรองรับให้กับโครงถักเป็นแบบยึดแน่น จะทำให้เกิดทิศทางอิสระด้านตั้งฉากกับระนาบของโครงถัก ส่วนคานรองรับจะติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะโก่ง จุดค้ำยันทางข้างแบบยึดหยุ่นบริเวณ ส่วนบน ของชิ้นส่วน กำหนดเป็นแบบสปริง จะติดกับจุดรองรับของคานรองรับเป็นแบบยึดแน่น น้ำหนักทดสอบจะติดบริเวณด้านล่างของโครงถักตรงข้อต่อของโครงถักในลักษณะห้วย ในกรณีของชิ้นส่วนบนของโครงถักรับน้ำหนักบรรทุกจะใช้โครงเหล็กขนาดใหญ่ส่งถ่ายน้ำหนักเข้าสู่ข้อต่อบนของโครงถัก ตาม (รูปที่ 2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.10** แผนภาพการติดตั้งตัวอย่าง [4]

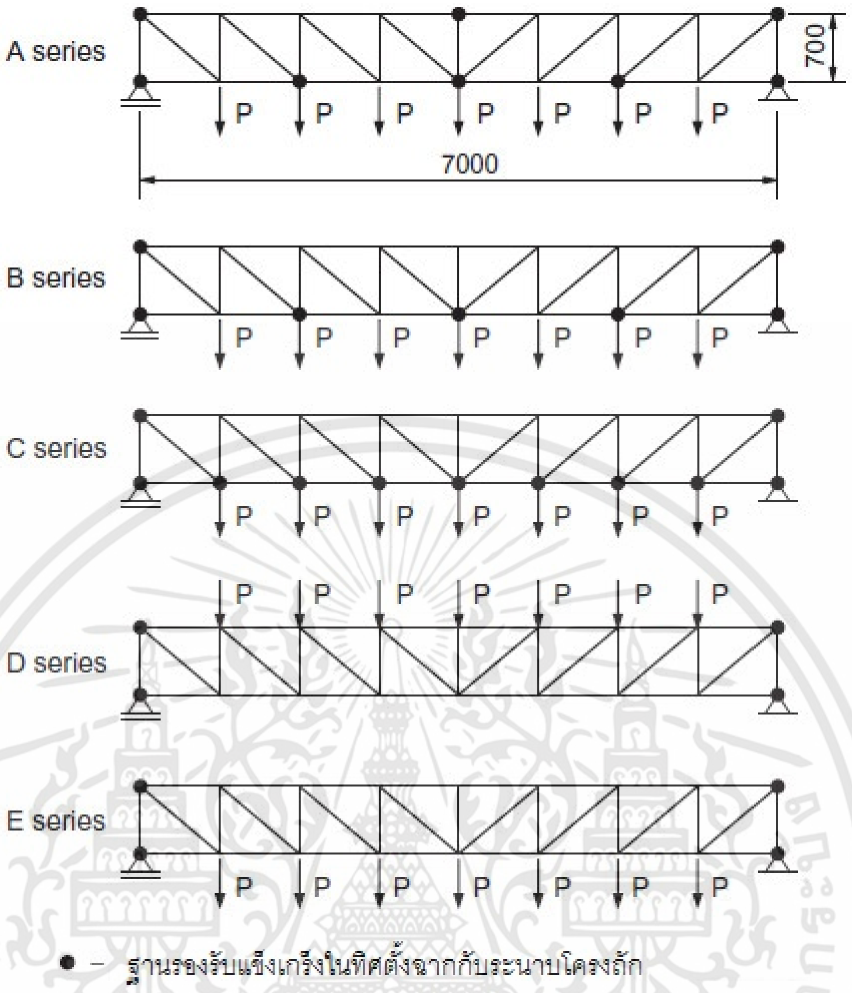
น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงถักทุกชนิดทำให้เกิดการเคลื่อนตัวจะส่งถ่ายไปสู่อุปกรณ์วัดระยะการโก่งตัว และทั้งโครงถักจะเคลื่อนพร้อมๆกัน การทดสอบจะให้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ละนิด

จนกระทั่งตรวจสอบได้ว่าโครงถักไม่มีเสถียรภาพหรือโก่งเดาะแล้ว ระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในทิศตั้งฉากกับระนาบของโครงถักจะป้อนเข้าสู่ โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวัดค่าระยะการเคลื่อนตัว

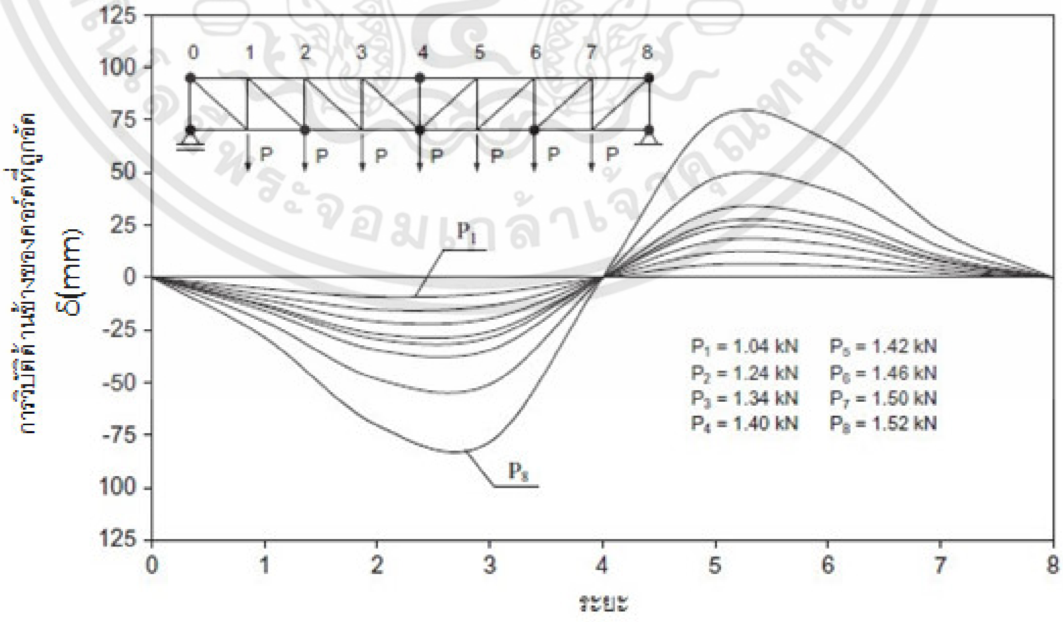
**2.6.3.3.1 การทดสอบแบบ Rigid lateral support**

กำหนดแบ่งลักษณะการทดสอบเป็น 5 ประเภท ที่สันนิฐานไว้เป็นการให้น้ำหนักบรรทุกแต่ละแบบและการค้ำยันทางข้างแต่ละแบบ ตามรูปที่ 6 และเพิ่มระยะที่ไม่มีค้ำยันทางข้างตามกลุ่มรูปแบบการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

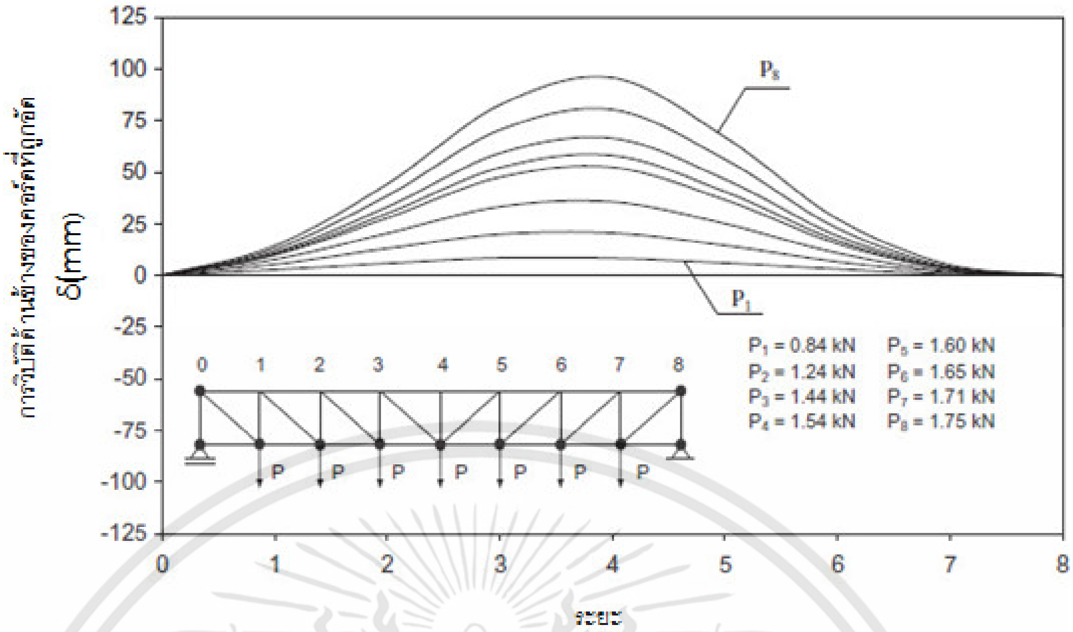



**รูปที่ 2.11** ประเภทของตัวอย่างของโครงถักที่ทดสอบ [4]



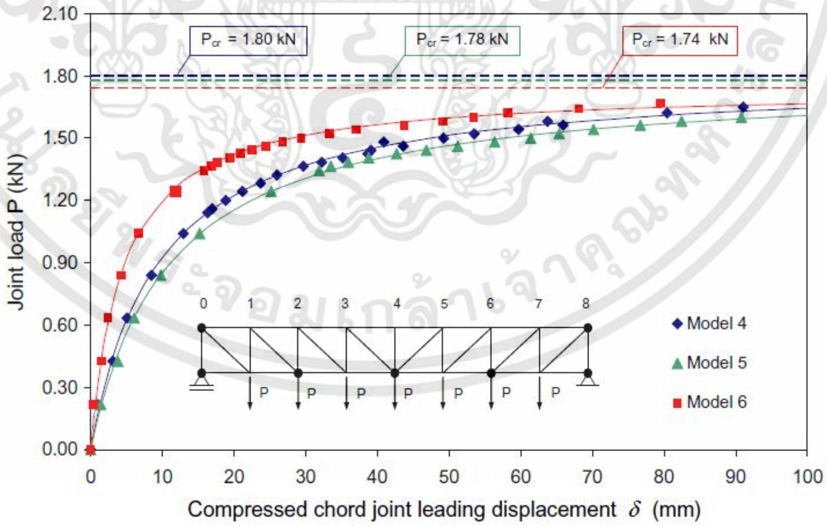

**รูปที่ 2.12** การโก่งเดาะของชิ้นส่วนในรูปการทดสอบ A [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



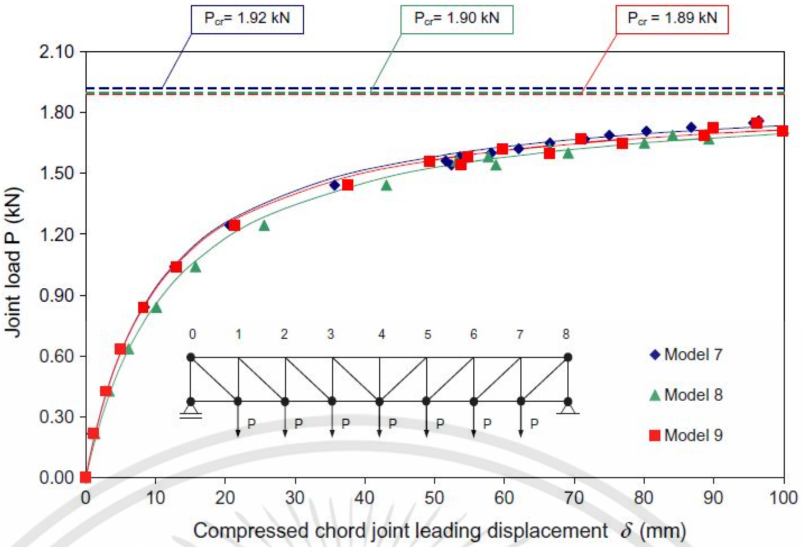

**รูปที่ 2.13** การโก่งเดาะของชิ้นส่วนในรูปการทดสอบ C [4]

เก็บค่าระยะการโก่งทางข้างตามกลุ่มแบบทดสอบ ตาม (รูปที่ 3.2 - 3.3) ผลคือ ค่าระยะการโก่งทิศตั้งฉากกับระนาบโครงถักนี้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง $\delta_i = f(P_i)$ กับน้ำหนักบรรทุกและระยะการโก่งตัวทำให้สามารถกำหนดน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่แท้จริงได้

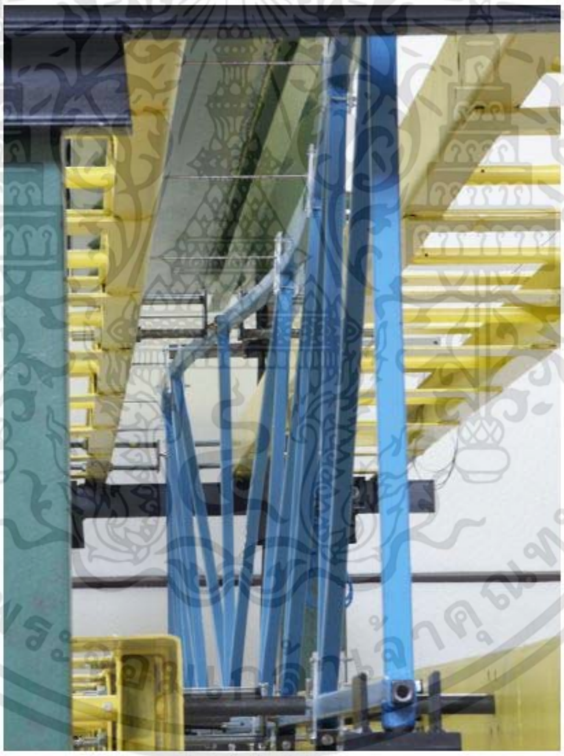



**รูปที่ 2.14** ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งตัวของการทดสอบแบบ B [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.15** ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งตัวของการทดสอบแบบ C [4]



**รูปที่ 2.16** ตัวอย่างภาพการทดสอบจริงของการทดสอบ A [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 2.17** ตัวอย่างภาพการทดสอบจริงของการทดสอบ C [4]

**รูปที่ 2.18** ตัวอย่างภาพการทดสอบจริงของการทดสอบ E [4]

ข้อมูลกราฟที่ได้ส่วนใหญ่นำไปสร้างรูปแบบการโก่งเดาะ โดยเฉพาะตามรูปแบบของแบบจำลองที่กำหนด น้ำหนักบรรทุกสูงสุด และ ระยะโก่งกำหนดจากการทดสอบและเปรียบเทียบระหว่าง ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นรูปทรงเรขาคณิตตามลักษณะโครงสร้างที่อุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติการคำนวณมาจากการวัดค่าน้ำหนักของตัวโครงถักเอง และขนาดหน้าตัดจริงและเพิ่มในการทดลอง การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์หาเสถียรภาพเพื่อเลือกโครงถักเป็นการดำเนินการของโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมคำนวณมาจากพื้นฐานของเกณฑ์หลักสถิตยศาสตร์เพื่อหาการเสียเสถียรภาพของโครงสร้างโดยวิธีสติฟเน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเมตริกเฉพาะโครงสร้างใช้โปรแกรมคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในช่วงยืดหยุ่นที่สอดคล้องกับการโก่งเดาะทางข้าง แล้ว เทียบเคียงผลเพื่อยืนยันผลจากโปรแกรมอื่นๆ

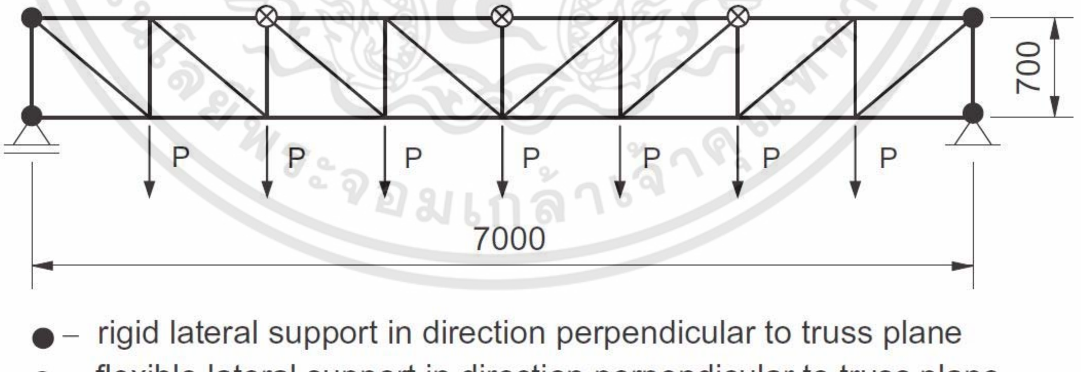
**ตารางที่ 2.1** แสดงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งเดาะของชิ้นส่วนรับแรงอัด เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองจริงกับผลการคำนวณทางโปรแกรม [4]

| Series | Model | Joint critical load $P_{cr}$ (kN) | | Buckling length values $L_{cr}$ (m) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Model test results | Numerical calculations | Model test results | Numerical calculations | Eurocode 3 guidelines (0.9$L$) |
| A | 1 | 1.56 | 1.70 | 1.43 | 1.38 | 3.15 |
| | 2 | 1.60 | 1.70 | 1.42 | 1.38 | 3.15 |
| | 3 | 1.60 | 1.70 | 1.42 | 1.38 | 3.15 |
| B | 4 | 1.80 | 1.70 | 1.35 | 1.38 | 6.30 |
| | 5 | 1.78 | 1.70 | 1.35 | 1.38 | 6.30 |
| | 6 | 1.74 | 1.70 | 1.36 | 1.38 | 6.30 |
| C | 7 | 1.92 | 1.84 | 1.30 | 1.33 | 6.30 |
| | 8 | 1.90 | 1.84 | 1.31 | 1.33 | 6.30 |
| | 9 | 1.89 | 1.84 | 1.31 | 1.33 | 6.30 |
| D | 10 | 0.48 | 0.49 | 2.51 | 2.50 | 6.30 |
| | 11 | 0.48 | 0.49 | 2.51 | 2.50 | 6.30 |
| | 12 | 0.48 | 0.49 | 2.51 | 2.50 | 6.30 |
| E | 13 | 0.56 | 0.57 | 2.35 | 2.33 | 6.30 |
| | 14 | 0.61 | 0.57 | 2.25 | 2.33 | 6.30 |

จากตารางที่ 2.1 ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากเป็นค่าที่ลู่เข้าระหว่างผลการทดลองและค่าจากการคำนวณ และมีส่วนที่แตกต่างระหว่าง น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดลองและค่าจากการคำนวณที่แตกต่างบ้างประมาณ 2% - 9.4%

**2.6.3.3.2 การทดสอบแบบ Flexible lateral support**

การทดสอบได้ใช้ตัวอย่างทดสอบสามตัวอย่างเหมือนกันที่กำหนดข้อต่อบนรับจุดรองรับแบบยืดหยุ่นทางข้างสามจุดตามรูปที่ 2.19

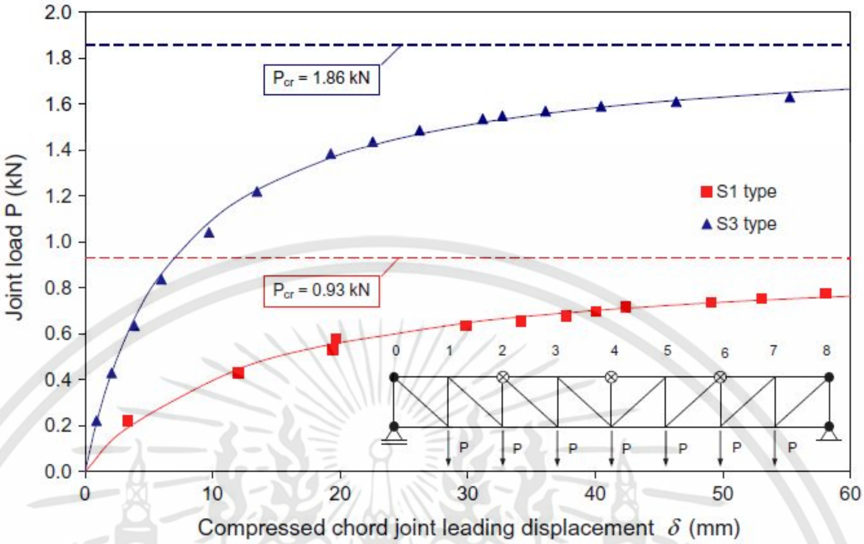



**รูปที่ 2.19** ประเภทของตัวอย่างของโครงถักที่ทดสอบ [4]

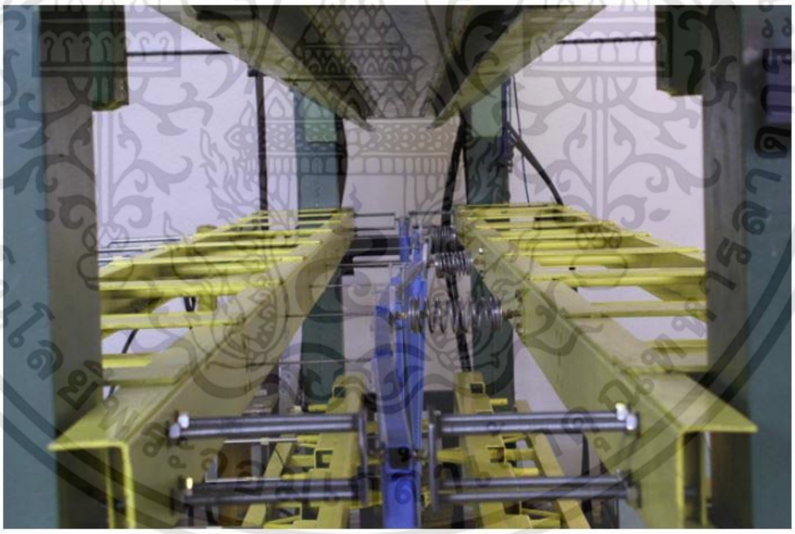
แต่ละแบบจำลองจะกำหนดจุดรองรับแบบยืดหยุ่นทางข้างในชิ้นส่วนรับแรงอัดสามแบบซึ่งโครงถักจะมีจุดรองรับทางข้างแบบยึดแน่นตรงปลาย ทดสอบเหมือนกัน บันทึกค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะการคำนวณระยะการโก่งตัวตามสมการหา $L_{cr}$ ผลที่ได้คือ ค่าการโก่งตัวสูงสุดเป็นฟังชั่นไม่ต่อเนื่อง $\delta_i = f(P_i)$ จากการประมาณตามรูปที่ 2.20




**รูปที่ 2.20** ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งตัวของการทดสอบS1 และ S3 [4]



**รูปที่ 2.21** ตัวอย่างรูปแบบการโก่งเดาะตามการทดสอบ flexible lateral support [4]

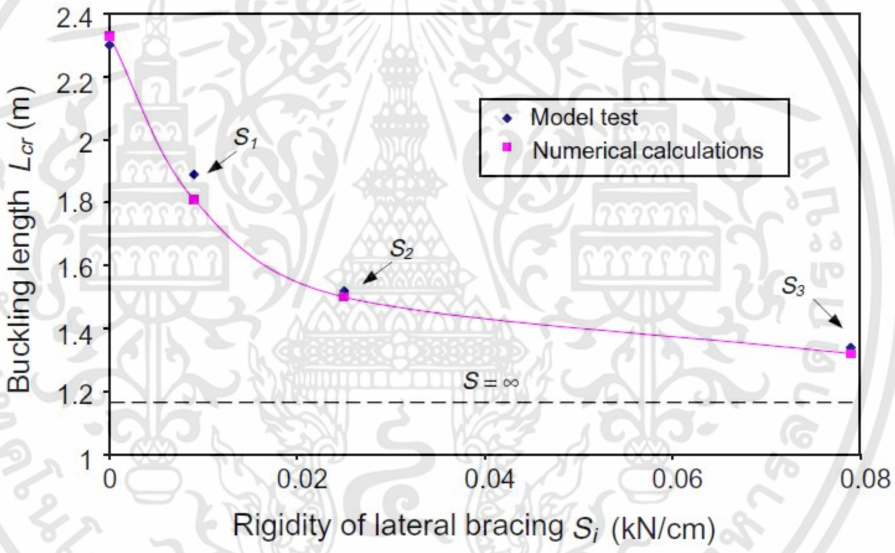
และจากการคำนวณโดยโปรแกรมครอบคลุมถึงค่าระยะโก่งตัวของจุดรองรับทางข้างแบบสปริงในชิ้นส่วนรับแรงอัด โดยสปริงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด 3.5 mm, 4.5 mm, 6.0 mmค่าสติฟเนสสปริงคือ 0.009 kN/cm, 0.025 kN/cm, 0.079 kN/cm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.2** แสดงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดกับระยะการโก่งเดาะของชิ้นส่วนรับแรงอัด เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองจริงกับผลการคำนวณทางโปรแกรม [4]

| Spring type | Spring rigidity $S_i$ (kN/cm) | Joint critical load $P_{cr}$ (kN) | | Buckling length values $L_{cr}$ (m) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Model test results | Numerical calculations | Model test results | Numerical calculations |
| $S=0$ | 0 | 0.59 | 0.57 | 2.30 | 2.33 |
| $S=S1$ | 0.009 | 0.93 | 1.01 | 1.89 | 1.81 |
| $S=S2$ | 0.025 | 1.43 | 1.48 | 1.52 | 1.50 |
| $S=S3$ | 0.079 | 1.86 | 1.90 | 1.34 | 1.32 |
| $S=\infty$ | $\infty$ | – | 2.33 | – | 1.17 |

ผลการทดสอบตามตารางที่ 2.2 เป็นที่หน้าพอใจมากเนื่องจาก ค่าลู่เข้าระหว่างผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการคำนวณวิเคราะห์ที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดใกล้เคียงกันมาก แต่ยังคงอยู่ในอัตรา 2% -9%ที่ต่างกัน ซึ่งค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและระยะโก่งตัวของชิ้นส่วนรับแรงอัดขึ้นอยู่กับลักษณะจุดรองรับด้านข้างตามรูปที่ 2.22




**รูปที่ 2.22** ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งเดาะกับค่าความแข็งสปริงในแบบทดสอบต่างๆ [4]

ยิ่งไปกว่านั้น การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าจุดรองรับทางข้างที่มีความแข็งน้อย จะทำให้โก่งตัวมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.4 สรุปผล

รายงานนี้ครอบคลุมถึง การศึกษาตัวอย่างทดลอง การโก่งทางข้างในช่วงยืดหยุ่นและได้พิจารณาถึงจุดรองรับทางข้างแบบยืดหยุ่นและจุดรองรับทางข้างแบบยืดแน่น รายงานนี้ยังพิสูจน์ให้เห็นถึงค่าการคำนวณวิเคราะห์ใกล้เคียงผลทดลอง น้ำหนักบรรทุกสูงสุดสอดคล้องกับระยะการโก่งตัวทางข้างซึ่งขึ้นอยู่กับตัวประกอบคุณที่สำคัญเช่น ชนิดของน้ำหนักบรรทุก (บนหรือล่าง โครงถัก) ระยะระหว่างค้ำยันทางข้าง สติฟเนสของจุดรองรับทางข้าง ชนิดของค้ำยันและความแข็งของค้ำยันเมื่อเทียบกับความแข็งของข้อต่อชิ้นส่วน ถึงแม้ว่ารู้ผลของตัวประกอบคูณของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด แต่ก็แนะนำว่าการวิเคราะห์เชิงปริมาณมีอิทธิพลต่อตัวประกอบคูณ รายงานนี้แสดงถึงระยะการโก่งตัวทางข้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดซึ่งน้อยกว่าระยะระหว่างค้ำยันทางข้างประมาณ 30% - 80% และขึ้นอยู่กับตัวแปรของค้ำยันทางข้างและชนิดของน้ำหนักบรรทุก ดังนั้นยูโรโคด 3 แนะนำค่าระยะการโก่งทางข้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดแบบกลวง เมื่อพิจารณาทิศตั้งฉากกับระนาบของโครงถักว่าเท่ากับ0.9 ของระยะที่ไม่มีค้ำยันทางข้าง เป็นค่าที่แนะนำที่ปลอดภัยตในการออกแบบแต่อาจไม่ประหยัดในการออกแบบเช่นกัน ระยะการโก่งของชิ้นส่วนรับแรงอัดตามความคิดของผู้เขียน ในแต่ละกรณีที่คำนวณได้ซึ่งพิสูจน์โครงถักทั้งโครงได้ แตไม่ได้พิสูจน์เฉพาะชิ้นส่วนรับแรงอย่างเดียวและแยกซึ่งกันและกันระหว่างชิ้นส่วนโครงถัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

# วิธีการดำเนินการวิจัย

## 3.1 แนวคิดในการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล

ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลขึ้นกับลักษณะเฉพาะของโครงสร้างนั้นทั้งความยาวในช่วงที่ไม่มีการค้ำยันทางข้าง ขึ้นกับความแข็งแรงของโครงสร้างเองและรูปแบบของโครงสร้างนั้นเองโดยในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม SAP2000 หาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถักแต่ละแบบ

ทฤษฎีออย์เลอร์ [1] ใช้ในการประมาณค่าการโก่งเดาะของชิ้นส่วนรับแรงอัด(Euler critical load,1757) [1] ที่นำมาประยุกต์ใช้กับการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถัก

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{3.1}$$

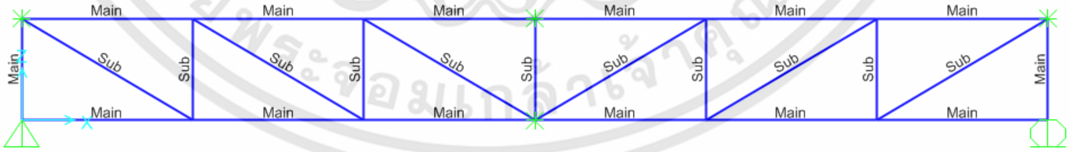
$E$ คือ ค่า Modulus young ของเหล็กรูปพรรณ

$I$ คือ Moment of inertia ของหน้าตัด

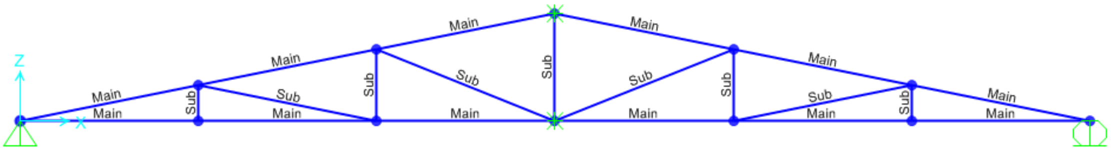
$K$ คือ ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล

$L$ คือ ระยะที่ไม่มีการค้ำยันทางข้างของโครงถัก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้แบ่งขอบเขตแบบจำลองที่ศึกษาเป็นโครงถักทั้งหมด 8 ชนิด คือ

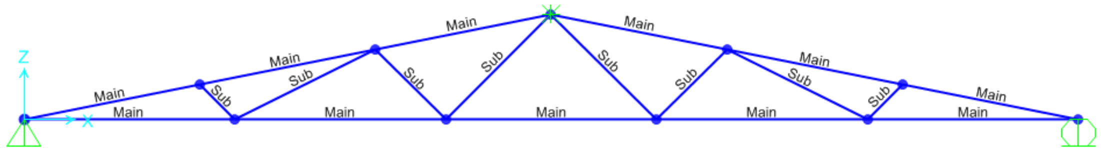



**รูปที่ 3.1** โครงถัก Pratt truss

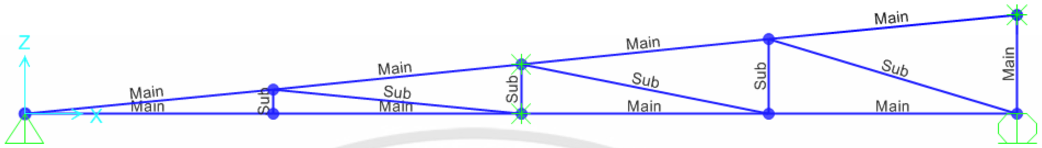



**รูปที่ 3.2** โครงถัก Triangle pratt

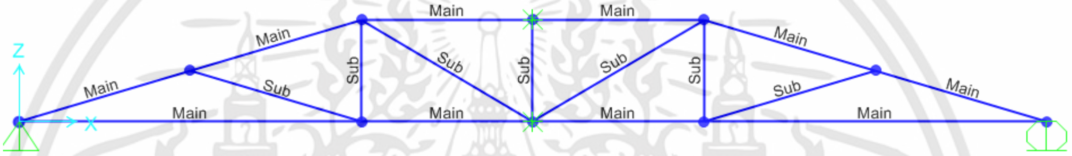
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



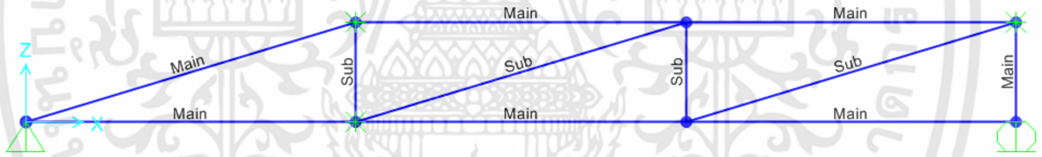

**รูปที่ 3.3** โครงถัก Triangle fink



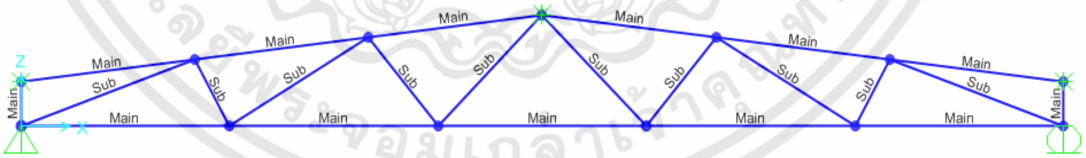

**รูปที่ 3.4** โครงถัก Pitch



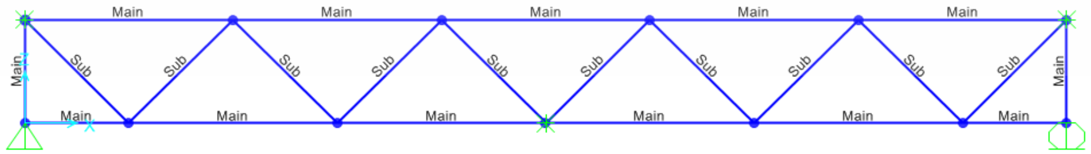

**รูปที่ 3.5** โครงถัก Hip




**รูปที่ 3.6** โครงถัก Half hip




**รูปที่ 3.7** โครงถัก Stub end




**รูปที่ 3.8** โครงถัก Foot bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ชิ้นส่วนของโครงถักในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรม

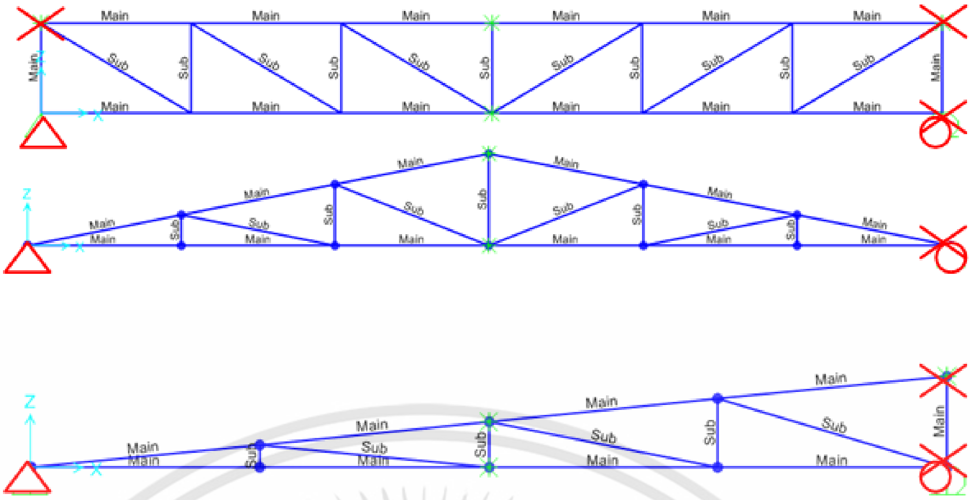
**ตารางที่ 3.1** รายละเอียดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ ตามขอบเขตการศึกษานี้

| ขนาดหน้าตัด (mm) | พื้นที่หน้าตัด ($cm^2$) | โมเมนต์อินเนอร์เชียร์ $I_y$, $I_z$($cm^4$) | ความหนา (mm) | โมดูลัสยัง E ($N/cm^2$) | พลาสติกโมดูลัสของหน้าตัด $S_y$, $S_z$($cm^3$) | รัศมีใจเรชัน $R_y$, $r_z$ (cm) | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25x25x2 | 1.840 | 1.635 | 2.000 | $208x10^5$ | 1.308 | 0.942 | ชิ้นส่วนหลัก |
| 45x45x2 | 3.440 | 10.620 | 2.000 | $208x10^5$ | 4.722 | 1.760 | ชิ้นส่วนหลัก |
| 20x20x2 | 1.440 | 0.787 | 2.000 | $208x10^5$ | 0.787 | 0.739 | ชิ้นส่วนย่อย |
| 40x40x2 | 3.040 | 7.337 | 2.000 | $208x10^5$ | 3.668 | 1.550 | ชิ้นส่วนย่อย |

## 3.3 ขอบเขตที่นำมาศึกษาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง

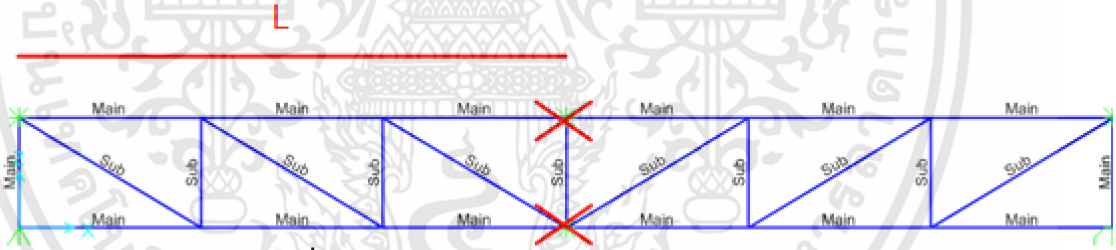
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงถักทั้งหมด 8 ชนิดเมื่อจำลองในโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ จะกำหนดให้ฐานรองรับเป็นฐานรองรับแบบยึดหมุนและฐานรองรับแบบล้อเลื่อนโดยในแต่ละชนิดมีฐานรองรับทางข้างที่ปลายบนล่างทั้งสองด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

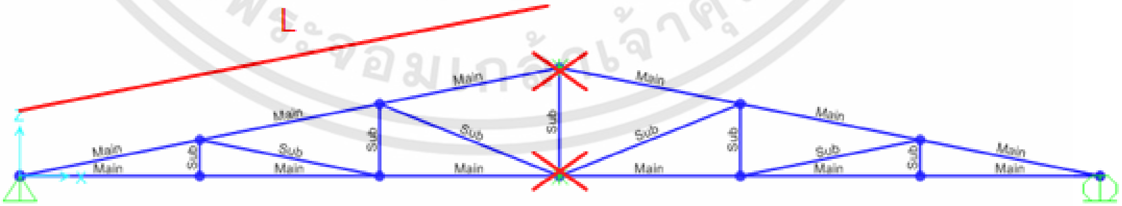



**รูปที่ 3.9** ลักษณะค้ำยันของแบบจำลองคณิตศาสตร์

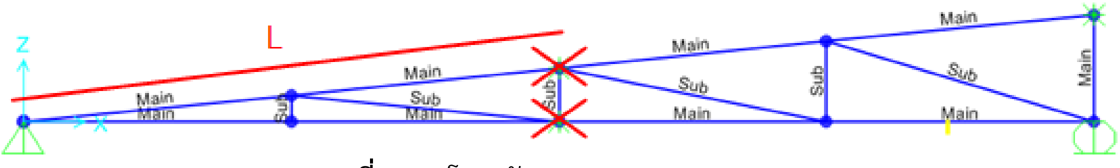
โดยแต่ละแบบจำลองจะใช้ค่า L หรือระยะที่ไม่มีค้ำยันทางข้างขึ้นอยู่กับรูปแบบของโครงถักนั้น โดยระยะที่ไม่มีค้ำยันทางข้างนี้จะพิจารณาจากโครงถักทั้งโครงถัก เพราะเมื่อเวลาโครงถักเกิดการโก่งเดาะจะเกิด ทั้งโครงถักพร้อมกัน จึงใช้จากระยะที่ไม่มีค้ำยันทางข้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดตาม (รูปที่ 3.10) ถึง (รูปที่ 3.15)




**รูปที่ 3.10** โครงถัก Pratt truss และระยะ L

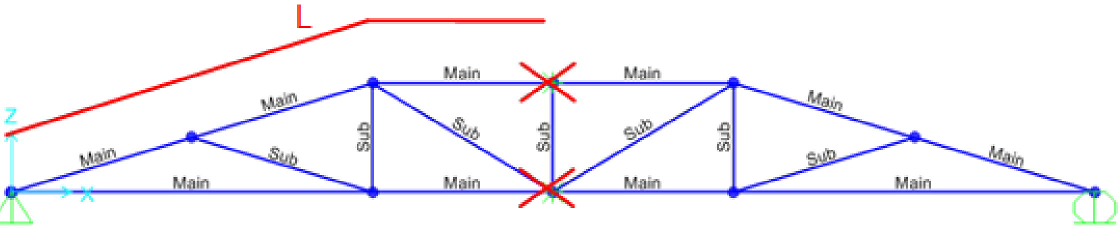



**รูปที่ 3.11** โครงถัก Triangle pratt และระยะ L

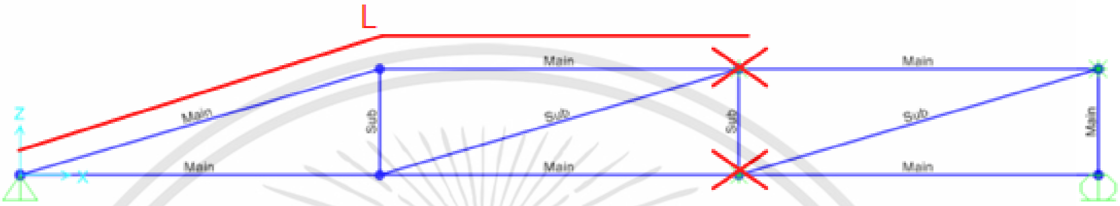



**รูปที่ 3.12** โครงถัก Pitch และระยะ L

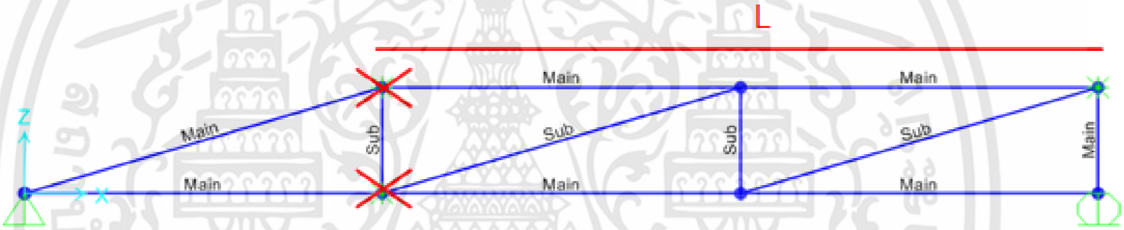
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.13** โครงถัก Hip และระยะ L

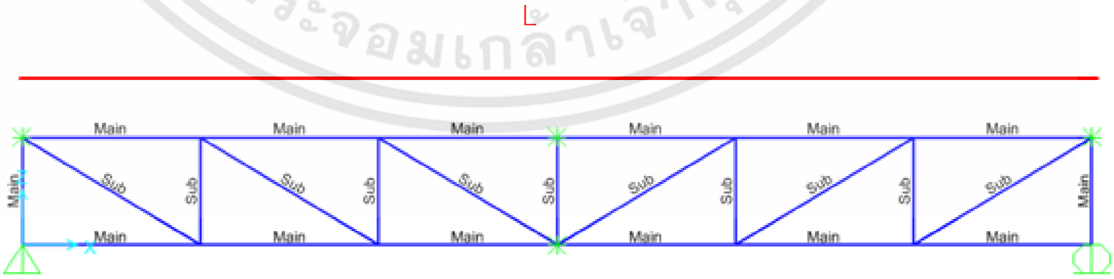



**รูปที่ 3.14** โครงถัก Half hip และระยะ L เมื่อค้ำยันอยู่ไกลปลายตัดเหลี่ยม



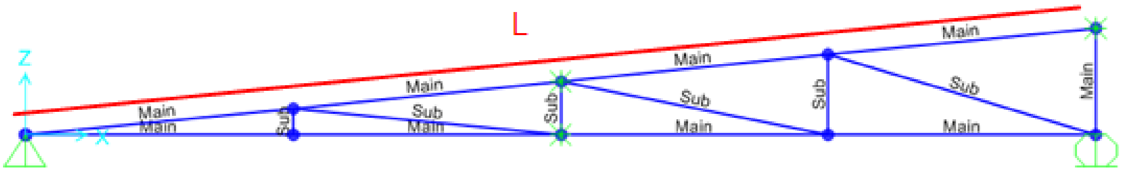

**รูปที่ 3.15** โครงถัก Half hip และระยะ L เมื่อค้ำยันอยู่ใกล้ปลายตัดเหลี่ยม

แต่เมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นกรณีศึกษาที่ไม่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ค่า L จะเป็นระยะความยาวทั้งหมดของชิ้นส่วนหลักที่รับแรงอัดด้านบนของโครงถักตามรูปทรงของโครงถักชนิดนั้นตาม (รูป 3.16) ถึง (รูปที่ 3.19)

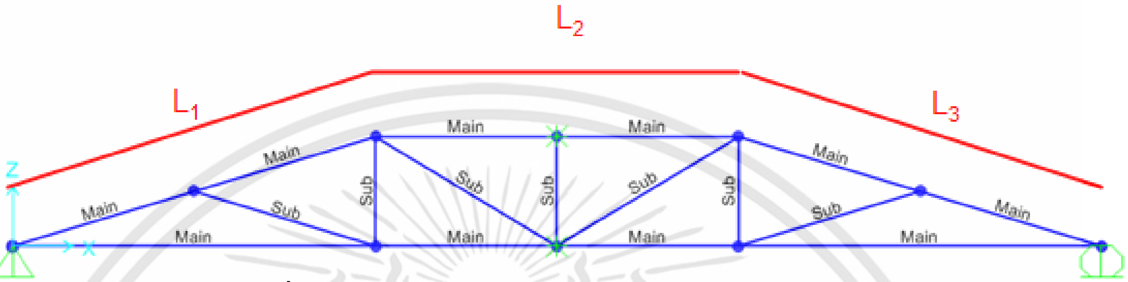



**รูปที่ 3.16** โครงถัก Pratt truss และระยะ L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



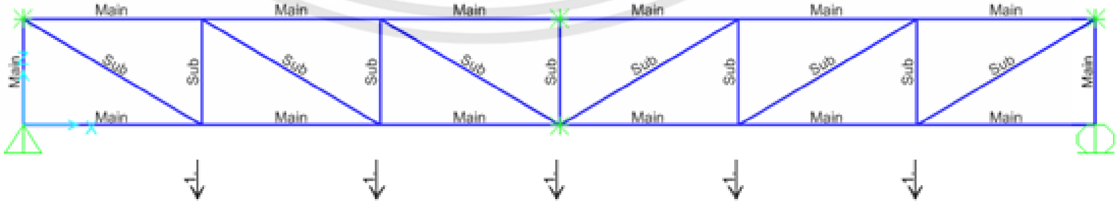

**รูปที่ 3.17** โครงถัก Pitch และระยะ L




**รูปที่ 3.18** โครงถัก Hip และระยะ $L = L_1 + L_2 + L_3$

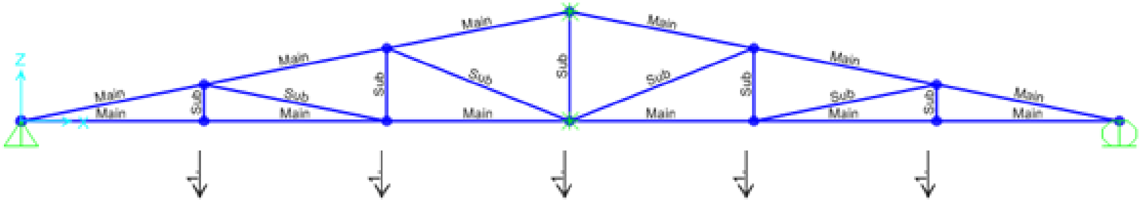
**รูปที่ 3.19** โครงถัก Half hip และระยะ $L = L_1 + L_2$

และทุกแบบจำลองจะกำหนดให้รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ ขนาด 1 KN บริเวณข้อต่อของชิ้นส่วนหลักด้านล่างทุกจุดยกเว้นข้อต่อจุดฐานรองรับแบบยึดหมุนและฐานรองรับแบบล้อเลื่อนที่ปลายทั้งสองข้าง เพื่อให้เกิดแรงกระทำกับโครงสร้างเพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของโครงถักรูปแบบนั้นๆ

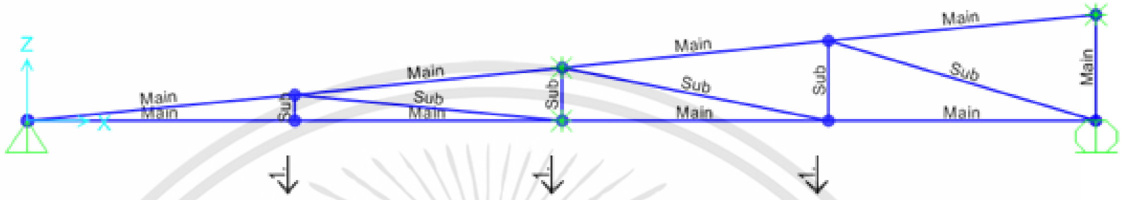



**รูปที่ 3.20** โครงถัก Pratt truss และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN

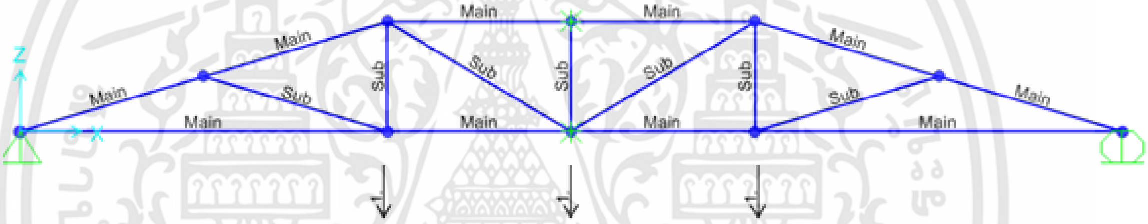
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



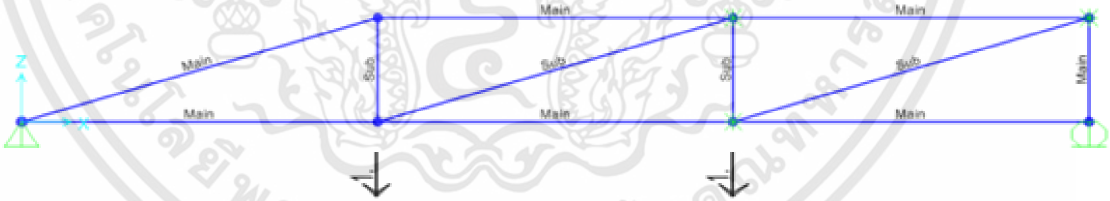

**รูปที่ 3.21** โครงถัก Triangle pratt และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN




**รูปที่ 3.22** โครงถัก Pitch และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN




**รูปที่ 3.23** โครงถัก Hip และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN



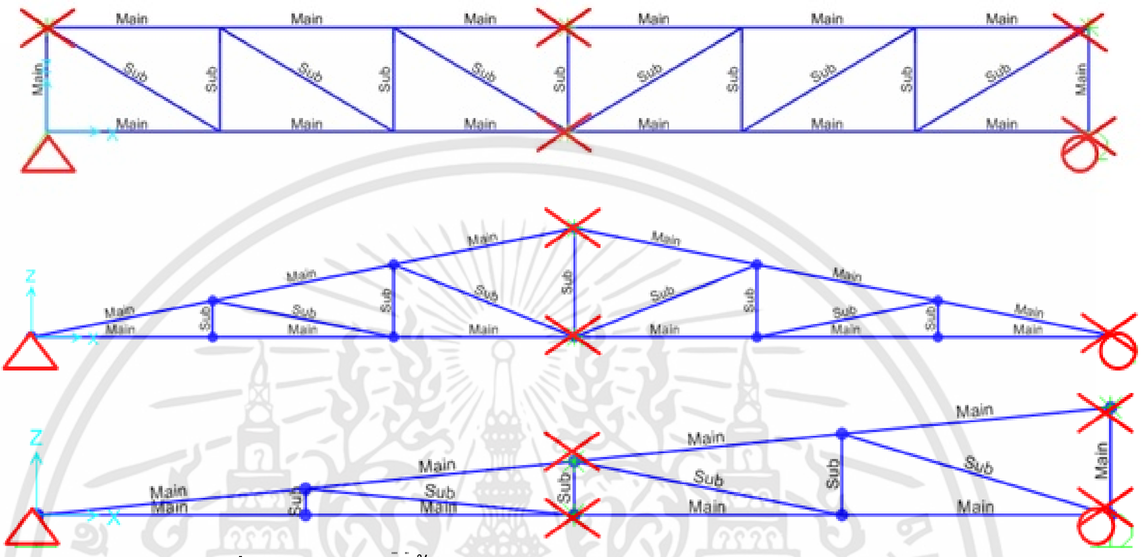

**รูปที่ 3.24** โครงถัก Half hip และการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 KN

อีกทั้งแต่ละแบบจำลองจะทำแบบจำลองหลายขนาดความยาว ซึ่งแต่ละความยาวจะมีระยะระหว่างฐานรองรับคือ 7 เมตร, 8เมตร, 10 เมตร, 12 เมตรตามลำดับโดยให้ความสูงของโครงถักมีค่าเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของความยาวระหว่างฐานทั้ง 4 ความยาวเช่นความยาวระหว่างฐาน7เมตรจะสูง 70 เซนติเมตรความยาวระหว่างฐาน 12 เมตรจะสูง 1.2 เมตร เพื่อตรวจสอบผลที่ได้ว่าเมื่อมีระยะความยาวระหว่างฐานเพิ่มขึ้นผลที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกันหรือไม่เพื่อทำให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 กรณีที่นำมาศึกษาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กรณีแรกการบังคับให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะในทิศทางด้านข้างอย่างเห็นได้ชัดโดยให้ใส่ค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างฐานของโครงถักทั้ง 8ชนิดและทำการหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลที่เกิดขึ้น

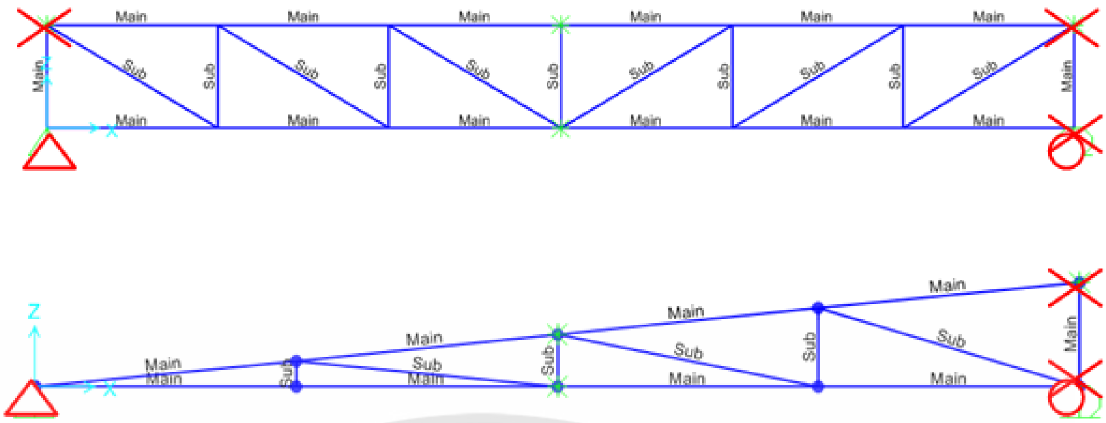



**รูปที่ 3.25** ลักษณะค้ำยันของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในกรณีแรก

กรณีที่สอง การบังคับให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะในทิศทางด้านข้างอย่างเห็นได้ชัดโดยให้ใส่ค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างฐานของโครงถักทั้ง 8 ชนิดแต่เพิ่มขนาดหน้าตัดให้ใหญ่ขึ้นอาทิ เช่น จากชิ้นส่วนหลักขนาด 25x25x2 มิลลิเมตร เป็นขนาด 45x45x2 มิลลิเมตร และ ชิ้นส่วนย่อยจากขนาด 20x20x2 มิลลิเมตร เป็นขนาด 40x40x2 มิลลิเมตร

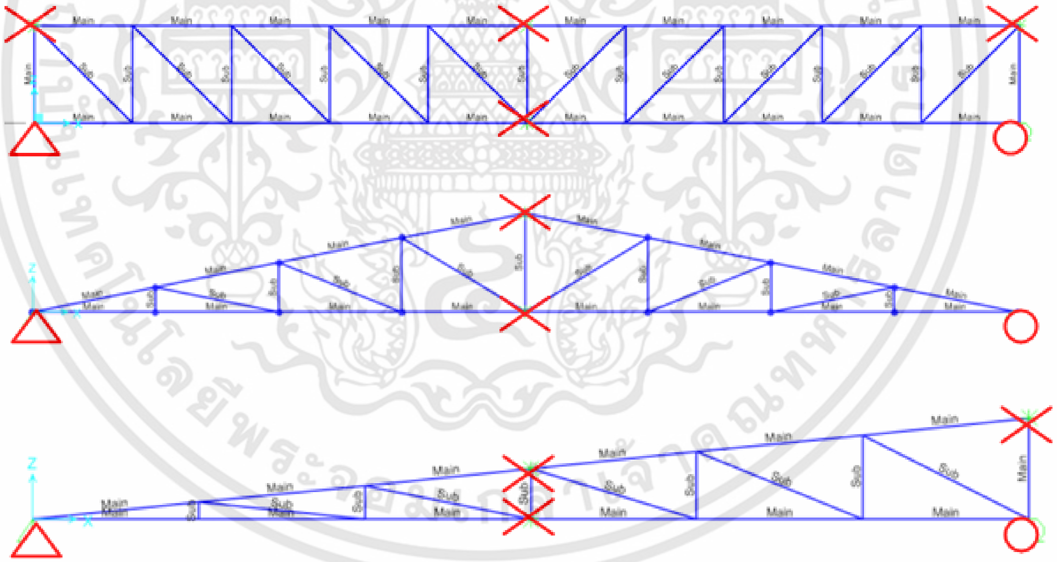
กรณีที่สาม การบังคับให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะในทิศทางด้านข้างโดยไม่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างฐานของโครงถักทั้ง 8 ชนิดโดยใช้หน้าตัดชิ้นส่วนหลัก 25x25x2 มิลลิเมตรและชิ้นส่วนย่อยหน้าตัด 20x20x2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.26** ลักษณะค้ำยันของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในกรณีสาม

กรณีที่สี่ การบังคับให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะในทิศทางด้านข้างโดยให้ใส่ค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างฐานของโครงถักทั้ง 8 ชนิด แต่เพิ่มจำนวนชิ้นส่วนย่อยภายใน แต่ระยะความยาวระหว่างฐานโดยรวมเท่าเดิมทั้งความยาว 7 เมตร, 8 เมตร, 10 เมตร, 12 เมตร ให้โครงถักมีความถี่ของชิ้นถักชิ้นส่วนย่อยมากขึ้น



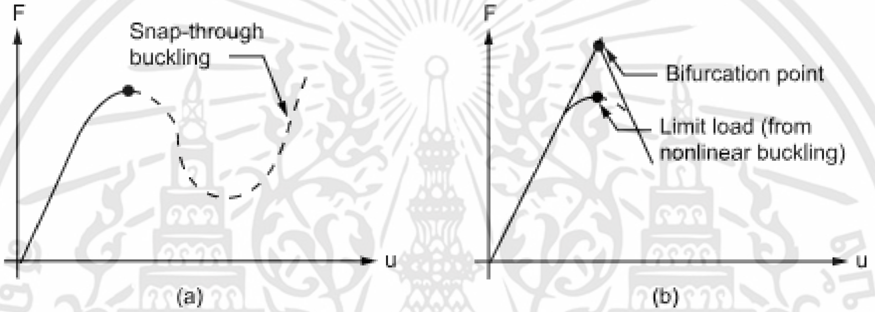

**รูปที่ 3.27** แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำมาศึกษาในกรณีที่สี่

## 3.5 วิธีดำเนินการศึกษา

เนื่องด้วยการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาค่าประมาณ ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถัก ซึ่งการโก่งเดาะที่ศึกษาหมายถึงการโก่งเดาะในระนาบทางข้างของ โครงถักแบบแผ่น (Plan truss) ซึ่งก็คือการโก่งเดาะในทิศแกนอ้างอิงหลัก (Global axis) และ เป็นการโก่งเดาะในช่วงที่วัสดุยังรับแรงในช่วง Elasticซึ่งการวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ จะใช้หลักการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Eigenvalue Buckling Analysis) [8] แต่โดยปกติแล้วการหาค่าประมาณการโก่งเดาะทางข้างหรือการเสียเสถียรภาพของโครงสร้างจะกระทำโดยวิธี Nonlinear Buckling Analysis ซึ่งคือการประมาณการโก่งเดาะโดยวิเคราะห์จากการเพิ่มปริมาณของ แรง มากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อหาระดับ แรง ที่โครงสร้างจะไม่เสถียร ซึ่งวิธีนี้จะกระทำภายใต้เงื่อนไข เป็นโครงสร้างทางสถิต (Static Structure) และ เงื่อนไขการเกิดการเสียรูปอย่างชัดเจน ซึ่งวิธีนี้สามารถกำหนด เงื่อนไขการเสียเสถียรภาพตั้งแต่เริ่มต้นได้ หรือพฤติกรรมแบบพลาสติก วิธีนี้ยังใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงสร้างหลังเกิดการโก่งเดาะ ซึ่งวิธีนี้จะได้ค่าประมาณการโก่งเดาะที่ใกล้เคียงสภาวะโครงสร้างจริงแต่ยุ่งยากและซับซ้อน แสดงตาม (รูปที่ 3.28) รูป (a) คือ Nonlinear load-deflection curve และรูป (b) Eigenvalue buckling curve

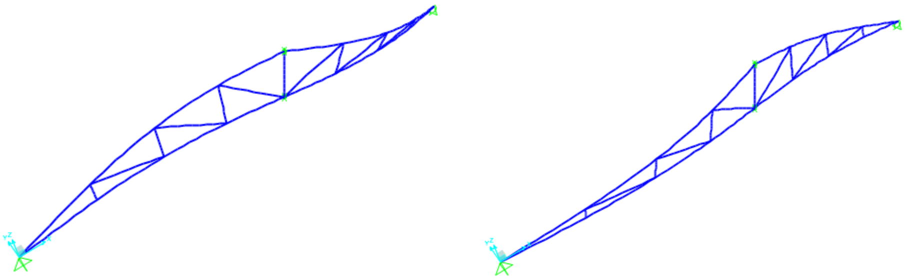



**รูปที่ 3.28** ลักษณะความแตกต่างของ Nonlinear load-deflection curveและ Eigenvalue buckling curve [8]

ดังนั้นการวิเคราะห์โดย Eigenvalue Buckling Analysis [8] จะให้ผลที่เร็วกว่าสามารถประมาณค่าการโก่งเดาะทางข้างได้ใกล้เคียงเทียบเท่ากับวิธี Nonlinear Buckling Analysis [8]

การวิเคราะห์โดย Eigenvalue Buckling Analysis [8] คือให้แรงเริ่มต้น (Pre-load) เป็นแรงที่ให้ไปเพื่อให้โครงสร้างเกิดการเริ่มต้นเสียเสถียรภาพ (Linear Perturbation) เป็นแรงกระทำเริ่มต้นให้โครงสร้างเกิดสภาวะรับแรง และกระจายแรงสู่ชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างโครงถัก เมื่อโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์วิเคราะห์แรงตามค่า แรงเริ่มต้นที่ให้ ได้แรงตามแนวแกนในชิ้นส่วนโครงสร้าง และ ค่า Buckling Load Factor หรือค่า Eigenvalueของ Buckling mode โดยตั้งค่าการวิเคราะห์ในโปแกรมให้ แรงเริ่มต้น เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิติ (Linear Static) และ ตั้งค่าโหมดการวิเคราะห์เป็นโหมดการโก่งเดาะ (Buckling Load case)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.29** รูปแบบการเสียรูปหรือภาพเคลื่อนไหวที่สอดคล้อง(Modal) – Mode shape 1 : Factor 0.23289

ค่า Buckling Load Factorหรือค่า Eigenvalue ที่ได้จะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ แต่ให้ดูภาพเคลื่อนไหวแสดงการโก่งเดาะทางข้างที่สอดคล้องกับทิศทางแรงเริ่มต้นเป็นหลัก ซึ่งค่าที่เป็น บวกจะมีที่ทิศการโก่งเดาะทางข้างที่สอดคล้อง ซึ่งแต่ละ Mode shape จะให้ค่า Buckling Load Factor หรือค่า Eigenvalue แต่ละ Mode shape แตกต่างกัน ซึ่งตามการวิจัยนี้ที่ต้องการประมาณค่าการโก่งเดาะทางข้างจะเลือกค่า EigenvalueMode shape แรกที่สอดคล้องและเป็นบวก เนื่องจากเป็น Mode shape ที่เกิดขึ้นง่ายที่สุด

ทั้งนี้จากภาพเคลื่อนไหวแสดงการโก่งเดาะทางข้างที่สอดคล้องกับทิศทาง ของแรงเริ่มต้นเป็นเพียงลักษณะภาพแนวโน้มของการโก่งเดาะทางข้างการโก่งเดาะที่แสดงไม่ใช่ระยะการโก่งเดาะทางข้าง ที่แท้จริง การเก็บผลการศึกษา ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ของแบบจำลองประกอบด้วย แรงตามแนวแกนที่เป็นแรงอัด จากชิ้นส่วนที่มีค่าแรงอัดสูงสุดจากโครงถักโครงนั้น และค่า Eigenvalue ของ Mode shape ที่เป็นบวก Mode shape แรก

แรงอัดสูงสุดจากชิ้นส่วนนี้ จะเป็นแรงวิกฤต ที่ทำให้โครงถักเกิดการโก่งเดาะทางข้าง และจากวิธี Eigenvalue Buckling Analysis จะใช้ค่าแรงวิกฤต $P_{cr}$ โดยการสมมุติว่าแรงอัดสูงสุดจากชิ้นส่วนนี้เป็น แรงวิกฤตคูณ Eigenvalue ของ Mode shape แรก เพราะเสมือน เป็นแรงวิกฤตที่เกิดก่อนการโก่งเดาะทางข้าง และเนื่องด้วย Eigenvalue นี้เป็นค่า Eigenvalue ของทั้งโครงสร้างโครงถักนี้ดังนั้นจากสมการของ Euler ต้องการหาค่า Kตัวคูณความยาวประสิทธิผล

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{3.2}$$

$P_{cr}$ คือ แรงอัดสูงสุด คูณ $f$ หรือ Buckling Load Factor *หรือค่า* Eigenvalue

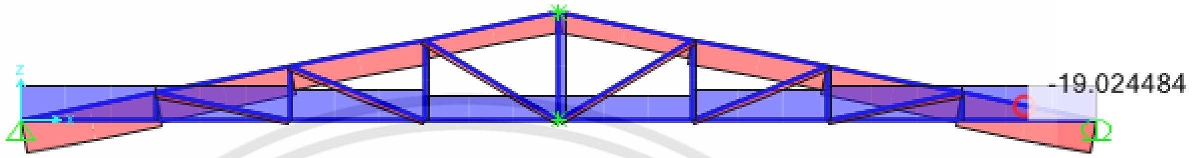
$E$ คือ 208 x $10^5$ นิวตันต่อตารางเซนติเมตร

$I$ คือ Moment of inertiaของหน้าตัด

$L$ คือ ระยะที่ไม่มีการค้ำยันทางข้างขึ้นอยู่กับแต่ละกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลจากแบบจำลองแต่ละชนิดไปแทนค่าในสมการของEulerเพื่อหาค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของโครงถักชนิดนั้นเช่น จาก (รูปที่ 3.30) ได้ค่าBuckling Load Factor หรือค่าEigen valueเท่ากับ0.23289 และแรงตามแนวแกนในชิ้นส่วนรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ19,027 นิวตัน




**รูปที่ 3.30** แรงตามแนวแกน จากชิ้นที่เป็นแรงอัดสูงสุด

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2(208x10^5)(1.635)}{(611.88)^2(0.23289)(19027)}} = 0.4498 \quad (3.3)$$

ข้อมูลจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่นำมาศึกษาเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลเชิงประสิทธิภาพของแต่ละกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

# ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

## 4.1 กรณีศึกษาแรกมีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ 20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ

### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร

**ตารางที่**4.1.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 3.60 m) | 180.00 | 7716 | 5.66258 | 0.48693 |
| Pratt truss (span 7.00 m) | 350.00 | 10450 | 1.15276 | 0.47692 |
| Howe truss (span 7.00 m) | 350.00 | 9797 | 1.27744 | 0.46790 |
| Triangle pratt | 356.93 | 13372 | 0.92003 | 0.46276 |
| Triangle fink | 356.93 | 10788 | 1.16874 | 0.45712 |
| Mono pitch | 351.70 | 16096 | 1.49045 | 0.33632 |
| Hip | 360.26 | 6225 | 1.14986 | 0.60107 |
| Half hip (front) | 466.67 | 3806 | 2.14258 | 0.43474 |
| Half hip (rear) | 476.93 | 3806 | 1.49299 | 0.50959 |
| Double stub end | 352.51 | 7283 | 1.75582 | 0.45959 |
| Foot bridge pratt | 350.00 | 6880 | 1.75291 | 0.47665 |
| Foot bridge howe | 350.00 | 6365 | 1.8631 | 0.48068 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร

**ตารางที่ 4.1.2** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 4.80 m) | 240.00 | 7787 | 3.15784 | 0.48680 |
| Pratt truss (span 8.00 m) | 400.00 | 10514 | 0.87709 | 0.47695 |
| Howe truss (span 8.00 m) | 400.00 | 9857 | 0.97197 | 0.46793 |
| Triangle pratt | 407.92 | 13461 | 0.69947 | 0.46285 |
| Triangle fink | 407.92 | 10872 | 0.88776 | 0.45715 |
| Mono pitch | 402.00 | 16242 | 1.13084 | 0.33628 |
| Hip | 411.74 | 6281 | 0.87161 | 0.60137 |
| Half hip (front) | 533.33 | 3852 | 1.61979 | 0.43488 |
| Half hip (rear) | 545.07 | 3852 | 1.12888 | 0.50971 |
| Double stub end | 402.87 | 7342 | 1.33316 | 0.45965 |
| Foot bridge pratt | 400.00 | 6934 | 1.33125 | 0.47671 |
| Foot bridge howe | 400.00 | 6417 | 1.41435 | 0.48077 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร

**ตารางที่ 4.1.3** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 6.00 m) | 300.00 | 7859 | 2.00269 | 0.48678 |
| Pratt truss (span 10.00 m) | 500.00 | 10642 | 0.55438 | 0.47704 |
| Howe truss (span 10.00 m) | 500.00 | 9978 | 0.61433 | 0.46800 |
| Triangle pratt | 509.90 | 13641 | 0.44149 | 0.46299 |
| Triangle fink | 509.90 | 11041 | 0.55928 | 0.45723 |
| Mono pitch | 502.49 | 16534 | 0.71076 | 0.33633 |
| Hip | 514.68 | 6393 | 0.54701 | 0.60194 |
| Half hip (front) | 666.60 | 3946 | 1.00957 | 0.43544 |
| Half hip (rear) | 681.28 | 3946 | 0.70385 | 0.51027 |
| Double stub end | 503.59 | 7461 | 0.8392 | 0.45976 |
| Foot bridge pratt | 500.00 | 7043 | 0.83837 | 0.47684 |
| Foot bridge howe | 500.00 | 6521 | 0.89001 | 0.48097 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร

**ตารางที่ 4.1.4** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 7.20 m) | 360.00 | 7931 | 1.37796 | 0.48681 |
| Pratt truss (span 12.00 m) | 600.00 | 10771 | 0.38024 | 0.47713 |
| Howe truss (span 12.00 m) | 600.00 | 10099 | 0.42136 | 0.46808 |
| Triangle pratt | 611.88 | 13818 | 0.30242 | 0.46317 |
| Triangle fink | 611.88 | 11209 | 0.38239 | 0.45734 |
| Mono pitch | 602.99 | 16834 | 0.47781 | 0.33877 |
| Hip | 617.61 | 6506 | 0.37258 | 0.60250 |
| Half hip (front) | 800.00 | 4039 | 0.68351 | 0.43585 |
| Half hip (rear) | 817.61 | 4039 | 0.4767 | 0.51066 |
| Double stub end | 604.30 | 7580 | 0.5733 | 0.45990 |
| Foot bridge pratt | 600.00 | 7152 | 0.573 | 0.47698 |
| Foot bridge howe | 600.00 | 6625 | 0.60783 | 0.48118 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.1.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรของกรณีศึกษาแรกมีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ 20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ**

**ตารางที่ 4.1.5** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักกรณีศึกษาแรก

| | ( 7.00 m) | ( 8.00 m) | ( 10.00 m) | ( 12.00 m) |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss | 0.4869 | 0.4868 | 0.4868 | 0.4868 |
| Pratt truss | 0.4769 | 0.4770 | 0.4770 | 0.4771 |
| Howe truss | 0.4679 | 0.4679 | 0.4680 | 0.4681 |
| Triangle pratt | 0.4628 | 0.4629 | 0.4630 | 0.4632 |
| Triangle fink | 0.4571 | 0.4572 | 0.4572 | 0.4573 |
| Mono pitch | 0.3363 | 0.3363 | 0.3363 | 0.3388 |
| Hip | 0.6011 | 0.6014 | 0.6019 | 0.6025 |
| Half hip (front) | 0.4347 | 0.4349 | 0.4354 | 0.4359 |
| Half hip (rear) | 0.5096 | 0.5097 | 0.5103 | 0.5107 |
| Double stub end | 0.4596 | 0.4597 | 0.4598 | 0.4599 |
| Foot bridge pratt | 0.4766 | 0.4767 | 0.4768 | 0.4770 |
| Foot bridge howe | 0.4807 | 0.4808 | 0.4810 | 0.4812 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 กรณีศึกษาที่สองมีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 45x45x2 มิลลิเมตร และ 40x40x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร

**ตารางที่ 4.2.1** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 3.60 m) | 180.00 | 7924 | 38.5932 | 0.46908 |
| Pratt truss (span 7.00 m) | 350.00 | 10889 | 7.76358 | 0.45883 |
| Howe truss (span 7.00 m) | 350.00 | 10209 | 8.70277 | 0.44756 |
| Triangle pratt | 356.93 | 13963 | 6.08624 | 0.44874 |
| Triangle fink | 356.93 | 11342 | 7.87357 | 0.43775 |
| Mono pitch | 351.70 | 17050 | 9.77581 | 0.32519 |
| Hip | 360.26 | 6600 | 7.48401 | 0.58315 |
| Half hip (front) | 466.67 | 4112 | 13.77012 | 0.42048 |
| Half hip (rear) | 476.93 | 4112 | 9.56082 | 0.49376 |
| Double stub end | 352.51 | 7679 | 11.85954 | 0.43892 |
| Foot bridge pratt | 350.00 | 7244 | 11.85331 | 0.45527 |
| Foot bridge howe | 350.00 | 6714 | 12.58712 | 0.45890 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร

**ตารางที่ 4.2.2** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 4.80 m) | 240.00 | 8066 | 21.39806 | 0.46829 |
| Pratt truss (span 8.00 m) | 400.00 | 11016 | 5.87626 | 0.45880 |
| Howe truss (span 8.00 m) | 400.00 | 10329 | 6.58875 | 0.44746 |
| Triangle pratt | 407.92 | 14137 | 4.60057 | 0.44883 |
| Triangle fink | 407.92 | 11505 | 5.94199 | 0.43778 |
| Mono pitch | 402.00 | 17332 | 7.3664 | 0.32507 |
| Hip | 411.74 | 6710 | 5.62793 | 0.58356 |
| Half hip (front) | 533.33 | 4201 | 10.30728 | 0.42073 |
| Half hip (rear) | 545.07 | 4201 | 7.15869 | 0.49397 |
| Double stub end | 402.87 | 7795 | 8.94575 | 0.43890 |
| Foot bridge pratt | 400.00 | 7350 | 8.94325 | 0.45529 |
| Foot bridge howe | 400.00 | 6815 | 9.49019 | 0.45900 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร

**ตารางที่ 4.2.3** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 6.00 m) | 300.00 | 8207 | 13.47399 | 0.46804 |
| Pratt truss (span 10.00 m) | 500.00 | 11271 | 3.67534 | 0.45882 |
| Howe truss (span 10.00 m) | 500.00 | 10567 | 4.12051 | 0.44753 |
| Triangle pratt | 509.90 | 14486 | 2.87086 | 0.44903 |
| Triangle fink | 509.90 | 11833 | 3.69677 | 0.43782 |
| Mono pitch | 502.49 | 17897 | 4.56675 | 0.32503 |
| Hip | 514.68 | 6929 | 3.4777 | 0.58442 |
| Half hip (front) | 666.60 | 4382 | 6.30252 | 0.42149 |
| Half hip (rear) | 681.28 | 4382 | 4.38029 | 0.49469 |
| Double stub end | 503.59 | 8028 | 5.55782 | 0.43895 |
| Foot bridge pratt | 500.00 | 7562 | 5.55959 | 0.45544 |
| Foot bridge howe | 500.00 | 7019 | 5.89166 | 0.45922 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร

**ตารางที่ 4.2.4** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 7.20 m) | 360.00 | 8349 | 9.20115 | 0.46795 |
| Pratt truss (span 12.00 m) | 600.00 | 11525 | 2.49488 | 0.45893 |
| Howe truss (span 12.00 m) | 600.00 | 10806 | 2.7969 | 0.44763 |
| Triangle pratt | 611.88 | 14832 | 1.94487 | 0.44929 |
| Triangle fink | 611.88 | 12158 | 2.49691 | 0.43797 |
| Mono pitch | 602.99 | 18477 | 3.05741 | 0.32579 |
| Hip | 617.61 | 7149 | 2.33391 | 0.58528 |
| Half hip (front) | 800.00 | 4563 | 4.19095 | 0.42206 |
| Half hip (rear) | 817.61 | 4563 | 2.91476 | 0.49519 |
| Double stub end | 604.30 | 8260 | 3.74851 | 0.43911 |
| Foot bridge pratt | 600.00 | 7775 | 3.7522 | 0.45562 |
| Foot bridge howe | 600.00 | 7223 | 3.97129 | 0.45948 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรของกรณีศึกษาที่สองมีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 45x45x2 มิลลิเมตร และ 40x40x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ

**ตารางที่ 4.2.5** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักกรณีศึกษาสอง

| | ( 7.00 m) | ( 8.00 m) | ( 10.00 m) | ( 12.00 m) |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss | 0.4691 | 0.4683 | 0.4680 | 0.4680 |
| Pratt truss | 0.4588 | 0.4588 | 0.4588 | 0.4589 |
| Howe truss | 0.4476 | 0.4475 | 0.4475 | 0.4476 |
| Triangle pratt | 0.4487 | 0.4488 | 0.4490 | 0.4493 |
| Triangle fink | 0.4378 | 0.4378 | 0.4378 | 0.4380 |
| Mono pitch | 0.3252 | 0.3251 | 0.3250 | 0.3258 |
| Hip | 0.5832 | 0.5836 | 0.5844 | 0.5853 |
| Half hip (front) | 0.4205 | 0.4207 | 0.4215 | 0.4221 |
| Half hip (rear) | 0.4938 | 0.4940 | 0.4947 | 0.4952 |
| Double stub end | 0.4389 | 0.4389 | 0.4389 | 0.4391 |
| Foot bridge pratt | 0.4553 | 0.4553 | 0.4554 | 0.4556 |
| Foot bridge howe | 0.4589 | 0.4590 | 0.4592 | 0.4595 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 กรณีศึกษาที่สามไม่มีจุดรอบรับทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ

### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร

**ตารางที่ 4.3.1** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 3.60 m) | 360.00 | 7716 | 2.73617 | 0.35024 |
| Pratt truss (span 7.00 m) | 700.00 | 10450 | 0.55071 | 0.34500 |
| Howe truss (span 7.00 m) | 700.00 | 9797 | 0.4965 | 0.37526 |
| Mono pitch | 703.49 | 16096 | 0.55069 | 0.27661 |
| Half hip | 710.27 | 3806 | 0.74396 | 0.48474 |
| Double stub end | 705.02 | 7283 | 0.73474 | 0.35524 |
| Foot bridge pratt | 700.00 | 6880 | 0.78578 | 0.35596 |
| Foot bridge howe | 700.00 | 6365 | 0.82713 | 0.36071 |

### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร

**ตารางที่ 4.3.2** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 4.80 m) | 480.00 | 7787 | 1.52482 | 0.35027 |
| Pratt truss (span 8.00 m) | 800.00 | 10514 | 0.41892 | 0.34506 |
| Howe truss (span 8.00 m) | 800.00 | 9857 | 0.37768 | 0.37533 |
| Mono pitch | 803.99 | 16242 | 0.41751 | 0.27672 |
| Half hip | 811.74 | 3852 | 0.56214 | 0.48502 |
| Double stub end | 805.74 | 7342 | 0.55765 | 0.35535 |
| Foot bridge pratt | 800.00 | 6934 | 0.59654 | 0.35607 |
| Foot bridge howe | 800.00 | 6417 | 0.62769 | 0.36084 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร

**ตารางที่ 4.3.3** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 6.00 m) | 600.00 | 7859 | 0.9666 | 0.35033 |
| Pratt truss (span 10.00 m) | 1000.00 | 10642 | 0.26468 | 0.34520 |
| Howe truss (span 10.00 m) | 1000.00 | 9978 | 0.23855 | 0.37552 |
| Mono pitch | 1004.99 | 16534 | 0.26208 | 0.27693 |
| Half hip | 1014.68 | 3946 | 0.35005 | 0.48581 |
| Double stub end | 1007.17 | 7461 | 0.35077 | 0.35557 |
| Foot bridge pratt | 1000.00 | 7043 | 0.37543 | 0.35628 |
| Foot bridge howe | 1000.00 | 6521 | 0.39474 | 0.36110 |

### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร

**ตารางที่ 4.3.4** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 7.20 m) | 720.00 | 7931 | 0.66483 | 0.35042 |
| Pratt truss (span 12.00 m) | 1200.00 | 10771 | 0.18147 | 0.34533 |
| Howe truss (span 12.00 m) | 1200.00 | 10099 | 0.16352 | 0.37569 |
| Mono pitch | 1205.99 | 16834 | 0.18518 | 0.27209 |
| Half hip | 1217.61 | 4039 | 0.2368 | 0.48652 |
| Double stub end | 1208.61 | 7580 | 0.23947 | 0.35579 |
| Foot bridge pratt | 1200.00 | 7152 | 0.25644 | 0.35649 |
| Foot bridge howe | 1200.00 | 6625 | 0.26943 | 0.36136 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.3.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรของกรณีศึกษาที่สามไม่มีจุดรอบรับทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ 20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ**

**ตารางที่ 4.3.5** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักกรณีศึกษาสาม

| | ( 7.00 m) | ( 8.00 m) | ( 10.00 m) | ( 12.00 m) |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss | 0.3502 | 0.3503 | 0.3503 | 0.3504 |
| Pratt truss | 0.3450 | 0.3451 | 0.3452 | 0.3453 |
| Howe truss | 0.3753 | 0.3753 | 0.3755 | 0.3757 |
| Mono pitch | 0.2766 | 0.2767 | 0.2769 | 0.2721 |
| Half hip | 0.4847 | 0.4850 | 0.4858 | 0.4865 |
| Double stub end | 0.3552 | 0.3554 | 0.3556 | 0.3558 |
| Foot bridge pratt | 0.3560 | 0.3561 | 0.3563 | 0.3565 |
| Foot bridge howe | 0.3607 | 0.3608 | 0.3611 | 0.3614 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.4 กรณีศึกษาที่สี่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ 20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ แต่เพิ่มชิ้นส่วนถัก ชิ้นส่วนย่อยให้ถี่ขึ้นแต่ความยาวโดยรวม เท่าเดิม**

**4.4.1 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร**

**ตารางที่ 4.4.1** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 3.60 m) | 180.00 | 10231 | 4.44741 | 0.47715 |
| Pratt truss (span 7.00 m) | 350.00 | 12982 | 0.95423 | 0.47030 |
| Howe truss (span 7.00 m) | 350.00 | 12463 | 1.04645 | 0.45835 |
| Triangle pratt | 356.93 | 18534 | 0.7037 | 0.44945 |
| Triangle fink | 356.93 | 15955 | 0.87916 | 0.43338 |
| Mono pitch | 351.75 | 26313 | 1.04077 | 0.31473 |
| Hip | 363.48 | 9181 | 0.77362 | 0.59807 |
| Half hip (front) | 420.00 | 6383 | 1.46069 | 0.45175 |
| Half hip (rear) | 436.52 | 6383 | 1.08393 | 0.50457 |
| Double stub end | 352.51 | 10128 | 1.30262 | 0.45248 |
| Foot bridge pratt | 350.00 | 9341 | 1.34291 | 0.46736 |
| Foot bridge howe | 350.00 | 8975 | 1.38429 | 0.46961 |

มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4.2 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร

**ตารางที่ 4.4.2** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 8 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 4.80 m) | 240.00 | 10308 | 2.48484 | 0.47697 |
| Pratt truss (span 8.00 m) | 400.00 | 13051 | 0.72669 | 0.47031 |
| Howe truss (span 8.00 m) | 400.00 | 12529 | 0.79693 | 0.45837 |
| Triangle pratt | 407.92 | 18633 | 0.53572 | 0.44952 |
| Triangle fink | 407.92 | 16049 | 0.66905 | 0.43342 |
| Mono pitch | 402.00 | 26482 | 0.79162 | 0.31476 |
| Hip | 415.40 | 9242 | 0.58801 | 0.59827 |
| Half hip (front) | 480.00 | 6437 | 1.10854 | 0.45184 |
| Half hip (rear) | 498.88 | 6437 | 0.82237 | 0.50474 |
| Double stub end | 402.87 | 10192 | 0.99105 | 0.45248 |
| Foot bridge pratt | 400.00 | 9400 | 1.02161 | 0.46738 |
| Foot bridge howe | 400.00 | 9033 | 1.05291 | 0.46964 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.4.3 **ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร**

**ตารางที่ 4.4.3** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 10 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 6.00 m) | 300.00 | 10385 | 1.57878 | 0.47693 |
| Pratt truss (span 10.00 m) | 500.00 | 13189 | 0.46012 | 0.47036 |
| Howe truss (span 10.00 m) | 500.00 | 12661 | 0.5046 | 0.45842 |
| Triangle pratt | 509.90 | 18830 | 0.33908 | 0.44965 |
| Triangle fink | 509.90 | 16165 | 0.4235 | 0.43425 |
| Mono pitch | 502.49 | 26822 | 0.50001 | 0.31483 |
| Hip | 519.26 | 9366 | 0.37092 | 0.59860 |
| Half hip (front) | 600.00 | 6547 | 0.66371 | 0.46321 |
| Half hip (rear) | 623.61 | 6547 | 0.48686 | 0.52036 |
| Double stub end | 503.60 | 10318 | 0.62632 | 0.45254 |
| Foot bridge pratt | 500.00 | 9517 | 0.64551 | 0.46749 |
| Foot bridge howe | 500.00 | 9148 | 0.66507 | 0.46976 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4.4 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร

**ตารางที่ 4.4.4** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 12 เมตร

| | L (cm) | Axial force (N) | Factor | K |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss (span 7.20 m) | 360.00 | 10462 | 1.08825 | 0.47694 |
| Pratt truss (span 12.00 m) | 600.00 | 13326 | 0.32612 | 0.47044 |
| Howe truss (span 12.00 m) | 600.00 | 12793 | 0.34669 | 0.45849 |
| Triangle pratt | 611.88 | 19027 | 0.23289 | 0.44979 |
| Triangle fink | 611.88 | 16425 | 0.29028 | 0.43362 |
| Mono pitch | 602.99 | 27161 | 0.34275 | 0.31490 |
| Hip | 623.11 | 9489 | 0.25393 | 0.59898 |
| Half hip (front) | 720.00 | 6656 | 0.453 | 0.46340 |
| Half hip (rear) | 748.33 | 6656 | 0.33203 | 0.52078 |
| Double stub end | 604.30 | 10445 | 0.42951 | 0.45263 |
| Foot bridge pratt | 600.00 | 9635 | 0.4426 | 0.46758 |
| Foot bridge howe | 600.00 | 9263 | 0.45587 | 0.46989 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.4.5 ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักความยาว 7, 8, 10, 12 เมตรของกรณีศึกษาที่สี่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ 20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ แต่เพิ่มชิ้นส่วนถัก ชิ้นส่วนย่อยให้ถี่ขึ้น แต่ความยาวโดยรวม เท่าเดิม**

**ตารางที่ 4.4.5** ผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างโครงถักกรณีศึกษาสี่

| | ( 7.00 m) | ( 8.00 m) | ( 10.00 m) | ( 12.00 m) |
|---|---|---|---|---|
| Pratt truss | 0.4772 | 0.4770 | 0.4769 | 0.4769 |
| Pratt truss | 0.4703 | 0.4703 | 0.4704 | 0.4704 |
| Howe truss | 0.4584 | 0.4584 | 0.4584 | 0.4585 |
| Triangle pratt | 0.4494 | 0.4495 | 0.4497 | 0.4498 |
| Triangle fink | 0.4334 | 0.4334 | 0.4343 | 0.4336 |
| Mono pitch | 0.3147 | 0.3148 | 0.3148 | 0.3149 |
| Hip | 0.5981 | 0.5983 | 0.5986 | 0.5990 |
| Half hip (front) | 0.4518 | 0.4518 | 0.4632 | 0.4634 |
| Half hip (rear) | 0.5046 | 0.5047 | 0.5204 | 0.5208 |
| Double stub end | 0.4525 | 0.4525 | 0.4525 | 0.4526 |
| Foot bridge pratt | 0.4674 | 0.4674 | 0.4675 | 0.4676 |
| Foot bridge howe | 0.4696 | 0.4696 | 0.4698 | 0.4699 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 ผลการวิจัยเมื่อเปรียบเทียบตามกรณีศึกษา

จากค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลทั้งหมดทั้ง 8 ตัวอย่างโครงถักที่นำมาศึกษาโดยกำหนดให้แต่ละชนิดที่ทำแบบจำลองมีความยาวคือ 7 เมตร, 8เมตร, 10เมตร, 12เมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อความยาวระหว่างฐานเพิ่มขึ้นค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งสรุปได้ว่าค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลที่ได้มีความถูกต้อง เป็นค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลเฉพาะตามลักษณะรูปแบบโครงถักชนิดนั้นๆ

**ตารางที่ 5.1** สรุปค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลของแต่ละกรณีการศึกษา

| ชนิดโครงถัก | กรณีที่นำมาศึกษา | | | |
|---|---|---|---|---|
| | กรณีแรก | กรณีสอง | กรณีสาม | กรณีสี่ |
| Pratt truss short span | 0.486 | 0.468 | 0.350 | 0.477 |
| Pratt truss long span | 0.477 | 0.458 | 0.345 | 0.470 |
| Howe truss long span | 0.467 | 0.447 | 0.375 | 0.458 |
| Triangle howe | 0.462 | 0.449 | - | 0.449 |
| Triangle fink | 0.457 | 0.437 | - | 0.433 |
| Mono Pitch | 0.336 | 0.325 | 0.276 | 0.314 |
| Hip | 0.601 | 0.584 | - | 0.598 |
| Half hip | | | | |
| Front lateral support | 0.434 | 0.420 | 0.486 | 0.451 – 0.463 |
| Rear lateral support | 0.509 | 0.493 | - | 0.504 – 0.520 |
| Double stub end | 0.459 | 0.438 | 0.356 | 0.452 |
| Foot bridge | | | | |
| Pratt Type | 0.476 | 0.455 | 0.356 | 0.467 |
| Howe Type | 0.480 | 0.458 | 0.361 | 0.469 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เปรียบเทียบผลการศึกษาจากกรณีแรกกับกรณีการศึกษาที่สอง

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลจากการใช้หน้าตัดขนาด 25x25x2 มิลลิเมตร และ 20x20x2 มิลลิเมตร มาเป็นหน้าตัดขนาด 45x45x2 มิลลิเมตร และ 40x40x2 มิลลิเมตร ทำให้ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล ลดลงแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้หน้าตัดของชิ้นส่วนใหญ่ขึ้นทำให้โครงสร้างของโครงถักมีความแข็งแรงต่อการโก่งเดาะมากขึ้นแต่ผลต่างของค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลก็ไม่แตกต่างมากนักประมาณ 3 - 6 % เท่านั้น

2. เปรียบเทียบผลการศึกษาจากกรณีแรกกับกรณีการศึกษาที่สาม

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลจากที่ กรณีแรกมีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลางกับกรณีที่สามที่ไม่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง โดยทั้งสองกรณีการศึกษา ใช้ขนาดหน้าตัด ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อย เท่ากันทำให้เห็นว่า การมีค้ำยันทางข้างทำให้การโก่งเดาะเกิดขึ้นได้ง่ายเพราะจะเกิดที่ระยะ $L/2$ ทั้งสองด้านเท่านั้น แต่เมื่อทำให้เกิดการโก่งเดาะตลอดความยาวระหว่างฐานโดยไม่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง การโก่งเดาะยากขึ้น เนื่องจากโครงถักทั้งโครงมีการต้านการโก่งเดาะทางข้างซึ่งมีผลต่างค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลประมาณ 10 - 40 %

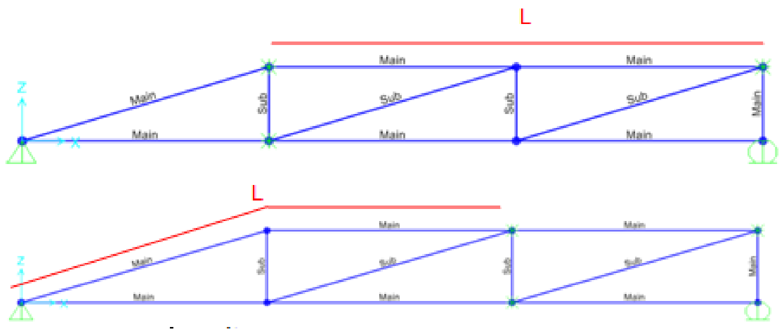
3. เปรียบเทียบผลการศึกษาจากกรณีแรกกับกรณีการศึกษาที่สี่

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลจากการที่เพิ่มชิ้นส่วนโครงถัก ชิ้นส่วนย่อยโดยให้ถักถี่ขึ้น จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าโครงถักชนิดเดียวกัน ค้ำยันทางข้างเหมือนกัน เพิ่มจำนวนถักมากขึ้นในความยาวรวมเท่าเดิม ทำให้สามารถต้านทานการโก่งเดาะมากขึ้นแต่เพิ่มแค่ประมาณ 1 - 2 % ในโครงถักที่มีรูปร่างสมมาตรตามความยาวระหว่างฐานรองรับยกเว้นโครงถักรูปสามเหลี่ยมเช่น Howe, Fink, Hip ที่มีค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลเพิ่มขึ้น 1 - 5 %

ข้อสังเกตว่าโครงถักที่มีรูปร่างไม่สมมาตรเช่น Pitch, Half hip การต้านทานการโก่งเดาะเพิ่มขึ้นประมาณ 7 % แต่ในส่วนโครงถักชนิด Half hip นั้นได้ทำการศึกษาค้ำยันทางข้างสองแบบเนื่องจากตัวโครงถักไม่สมมาตรคือค้ำยันทางข้างใกล้กับบริเวณด้านตัดเหลี่ยม และด้านไกลด้านตัดเหลี่ยมแสดงตามรูปที่ 5.1

ทำให้เห็นว่าเมื่อความยาวระหว่างฐานยิ่งยาวมากขึ้นการเกิดการโก่งเดาะจะเกิดใน Mode shape ที่ 1 คือเกิดได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5.1** ค้ำยันทางข้างของโครงถักชนิด Half hip

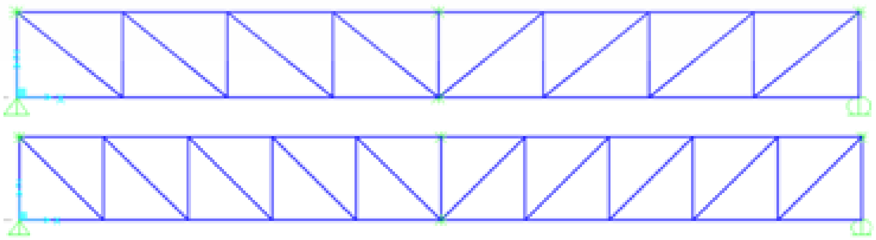
## 5.2 สรุปผล

1. ขนาดของหน้าตัดที่นำมาทำชิ้นส่วนโครงถักมีผลต่อการโก่งเดาะทางข้างของ โครงสร้าง โครงถักยิ่งหน้าตัดใหญ่ยิ่งลดการโก่งเดาะทางข้างได้มากขึ้น

2. สำหรับการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะทางข้างของโครงถัก ทั่วไปที่ไม่ใช่ โครงถักแบบสามเหลี่ยมจั่ว คือการเพิ่มขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนให้มี ขนาดใหญ่ขึ้นจะได้ผลดีกว่า การเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนถักโดยไม่เพิ่มขนาดหน้าตัด

3. สำหรับการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะทางข้างของโครงถักแบบสามเหลี่ยมจั่ว คือการเพิ่มชิ้นส่วนถัก ให้โครงถักมีความถี่มากขึ้น ได้ผลดีกว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

4. ความถี่การถักที่มากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ เพิ่มความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะทางข้างมากขึ้น แต่ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้จำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถี่การถักชิ้นส่วนย่อยโดยแบ่งช่องการถัก 8 ช่องเป็น 10 ช่อง เช่นตัวอย่าง ในแบบจำลองโครงถักชนิด Flat truss แสดงตามรูปที่ 32 เมื่อศึกษาเป็นกรณีศึกษาที่สี่ โดยเพิ่มช่องถักอีกเพียง 2 ช่องจึงยังทำให้ค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลลดลงไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลจากกรณีศึกษาแรก



**รูปที่ 5.2** เปรียบเทียบการเพิ่มช่องการถักของกรณีศึกษาที่หนึ่งกับกรณีศึกษาที่สี่ในรูปแบบโครงถักชนิด Pratt truss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลทั้งหมดทั้ง 8 ตัวอย่างโครงถักที่นำมาศึกษาเป็นเพียงค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลเฉพาะ ของโครงถักรูปแบบนั้นเท่านั้น ซึ่งถ้ารูปแบบการถักเปลี่ยนไปหรือลักษณะการค้ำยันทางข้าง เปลี่ยนไปค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผลนี้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นเพียงข้อสังเกต หรือแนวโน้มของประสิทธิภาพของโครงถัก ต่อ กำลังต้านทานการโก่งตัวทางข้างเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


[1] Taylor & Francis, **Structural Design for the Stage second edition**. Focal Press of the taylor & Francis Group. 2000.

[2] S. P. & Gere, J. M, **Theory of Elastic Stability 2 ed.** McGraw-Hill Companies Inc. 1963.

[3] ศาสตราจารย์ วินิต ช่อวิเชียร, และ ดร.วรนิติ ช่อวิเชียร, **การออกแบบโครงสร้างเหล็ก พิมพ์ครั้งที่ 4**. อาจารย์ วินิต ช่อวิเชียร. 2558.

[4] Joanna Jankowska-Sanberg and JaroslawKolodziej. "Experimental study of steel truss lateral-torsional buckling" **Engineering Structures 46**. Volume 2013, pp. 165-172.

[5] Eurocode 3. **Design of steel structures – Part 1–1: General rules and rules forbuildings**. ENV 1993–1-1, CEN, Brussels; 1992.

[6] American Institute of Steel Construction. **Frame stability allowable Stress Design, 9th. Ed**. 1989.

[7] American Institute of Steel Construction. **Frame stability Manual of Steel Construction Allowable Stress Design, 9th. Ed**. 1989.

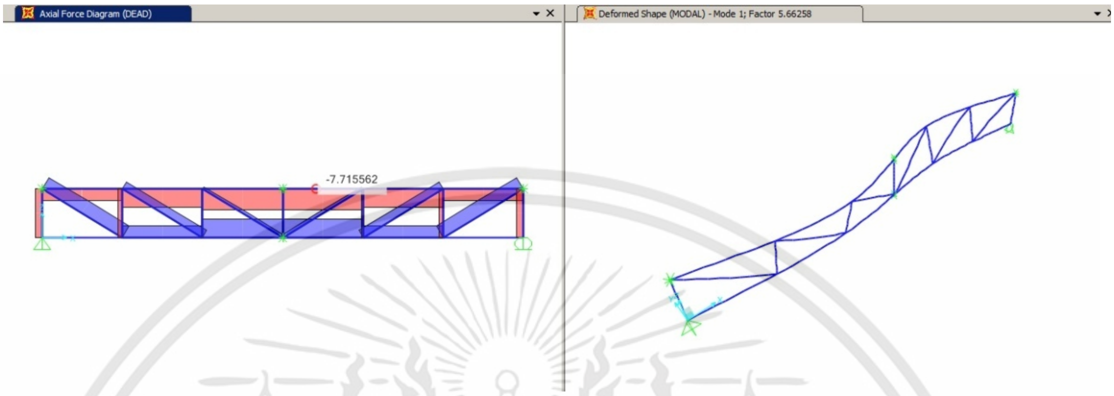
[8] Eigenvalue Buckling Analysis. Available at: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_sim/ds_buckling_analysis_type.html. Accessed May 29, 2018.html.



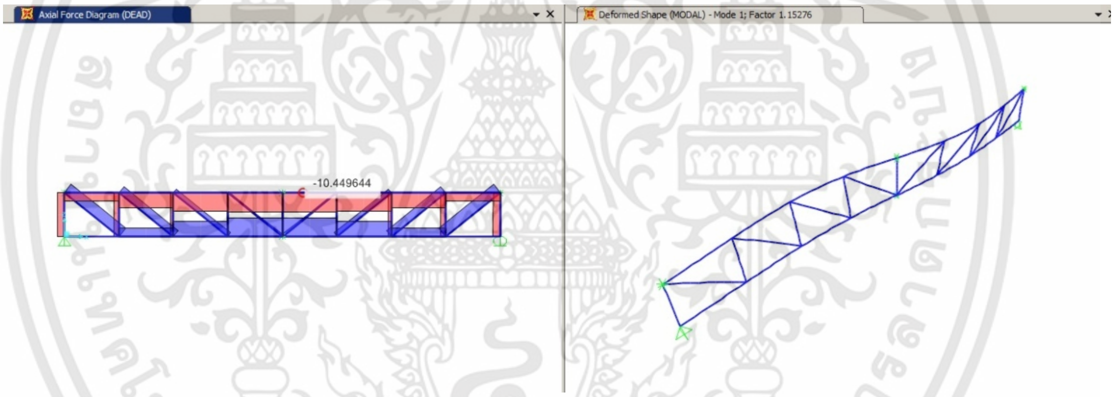
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

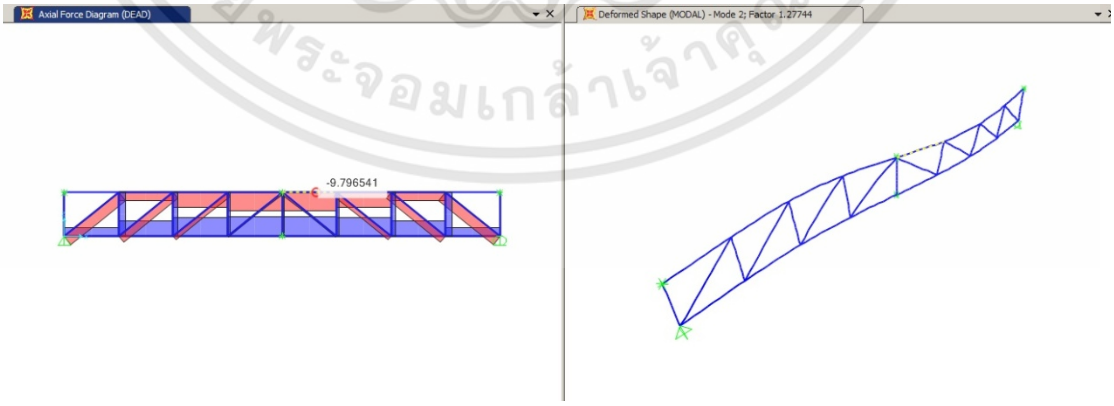
## 1. กรณีศึกษาแรกมีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ  20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ




Pratt truss span 3.60 เมตร axial force 7716 N factor 5.66258

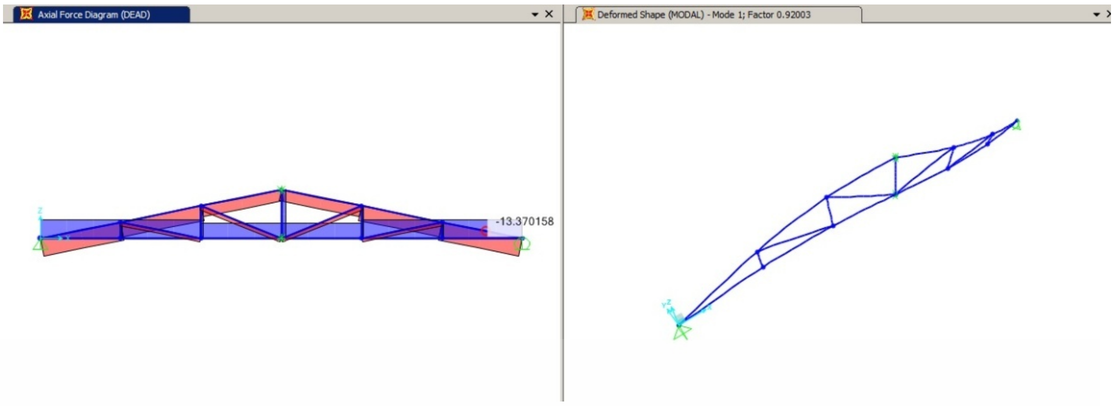



Pratt truss span 7.00 เมตร axial force 10450 N factor 1.15276

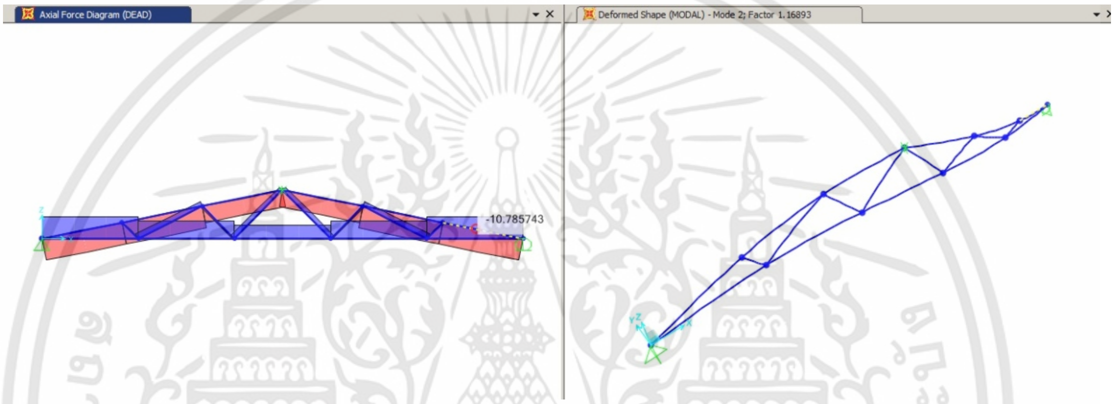



Howe truss span 7.00 เมตร axial force 9797 N factor 1.27744

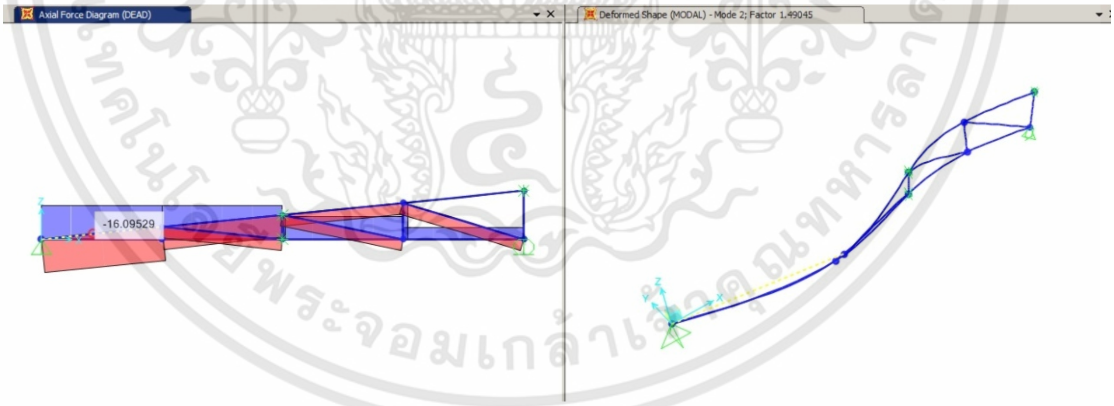
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 7.00 เมตร axial force 13372 N factor 0.92003

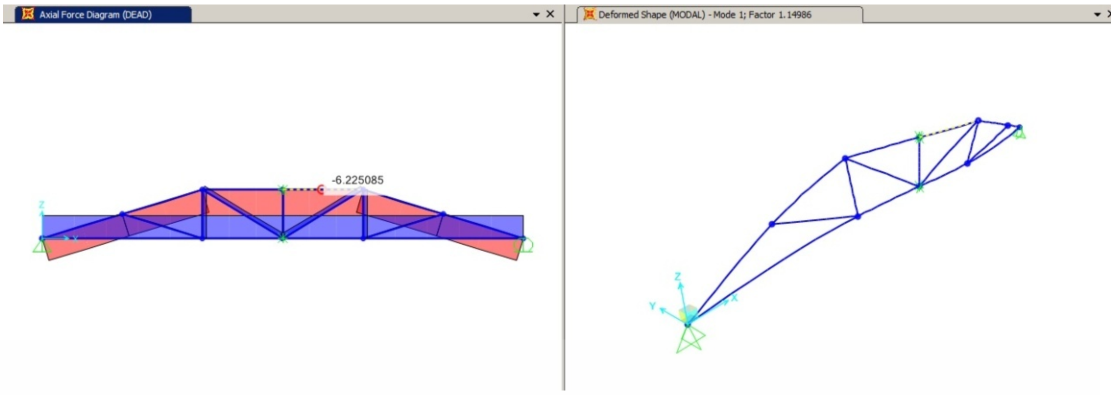



Triangle fink span 7.00 เมตร axial force 10788 N factor 1.16874

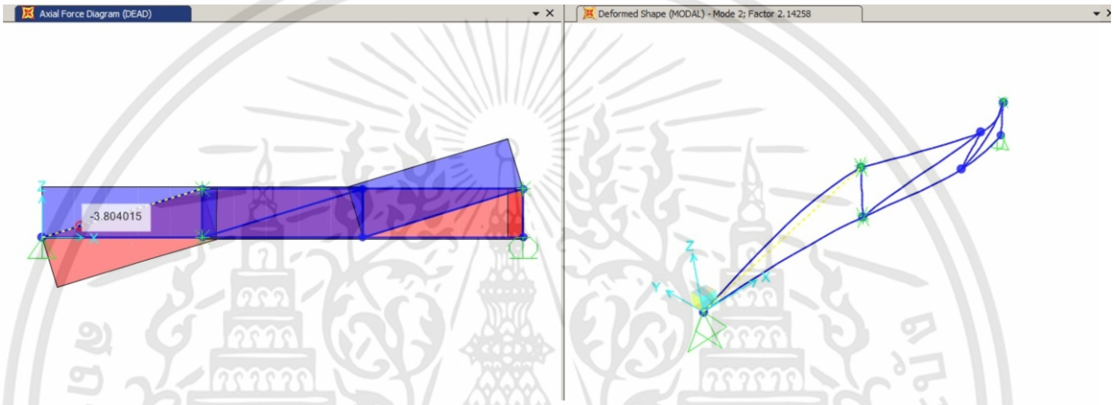



Mono pitch span 7.00 เมตร axial force 16096 N factor 1.49045

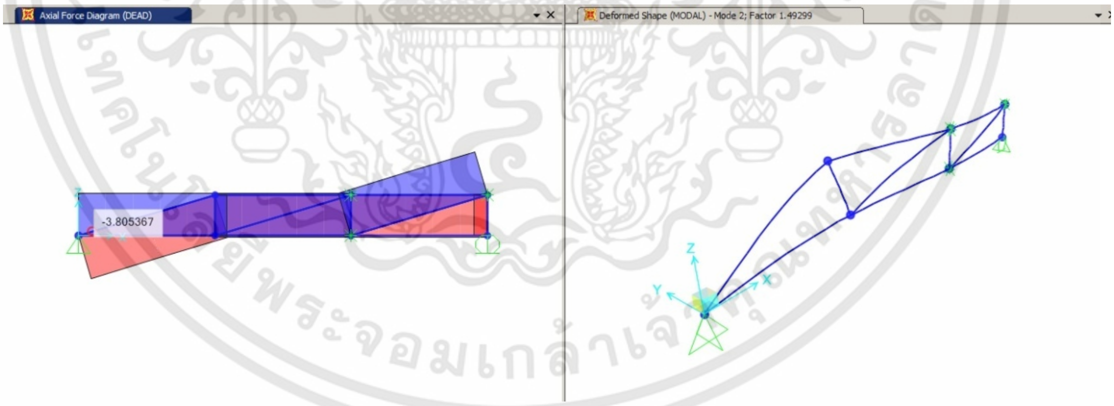
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 7.00 เมตร axial force 6225 N factor 1.14986

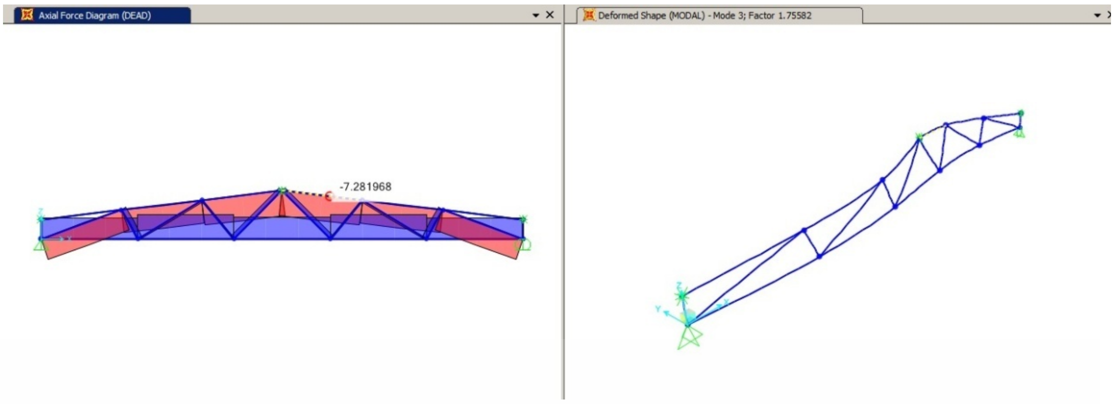



Half hip (front) span 7.00 เมตร axial force 3806 N factor 2.14258

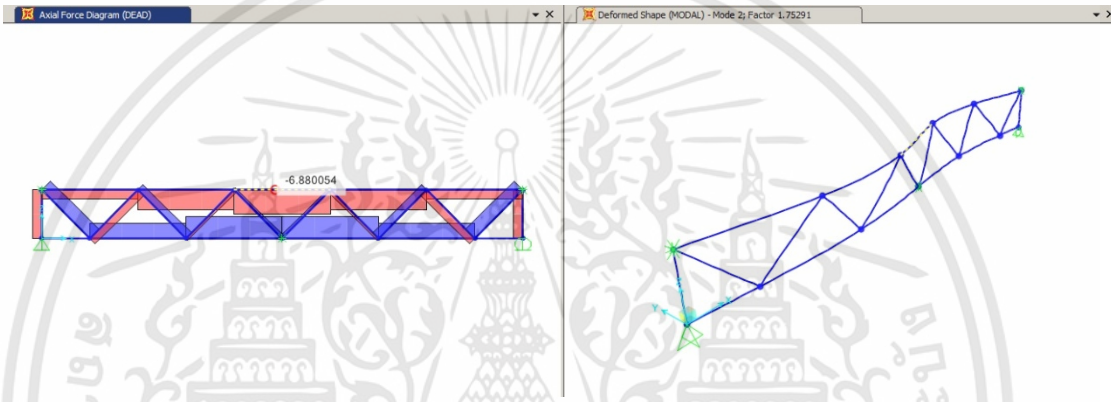



Half hip (rear) span 7.00 เมตร axial force 3806 N factor 1.49299

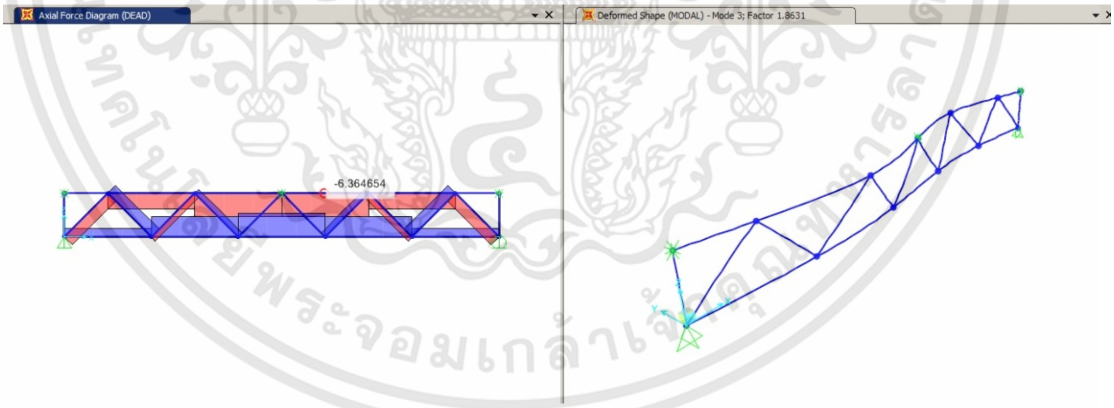
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 7.00 เมตร axial force 7283 N factor 1.75582

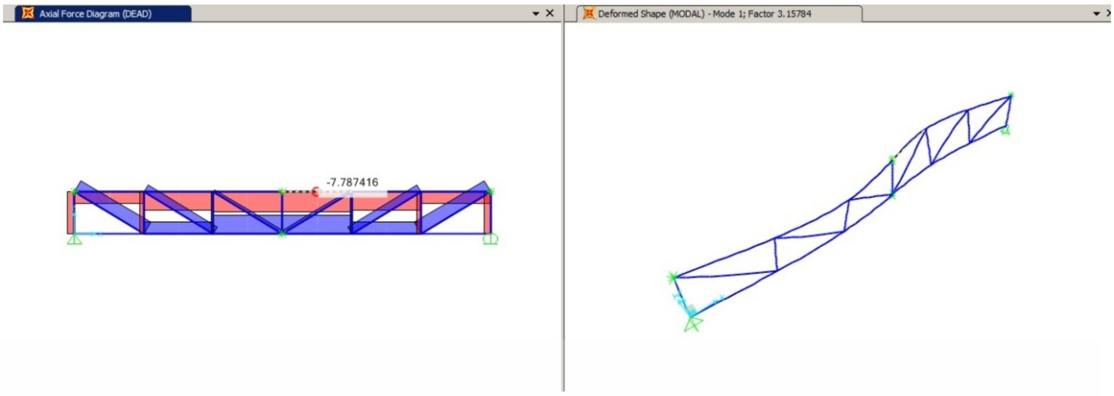



Foot bridge pratt span 7.00 เมตร axial force 6880 N factor 1.75291

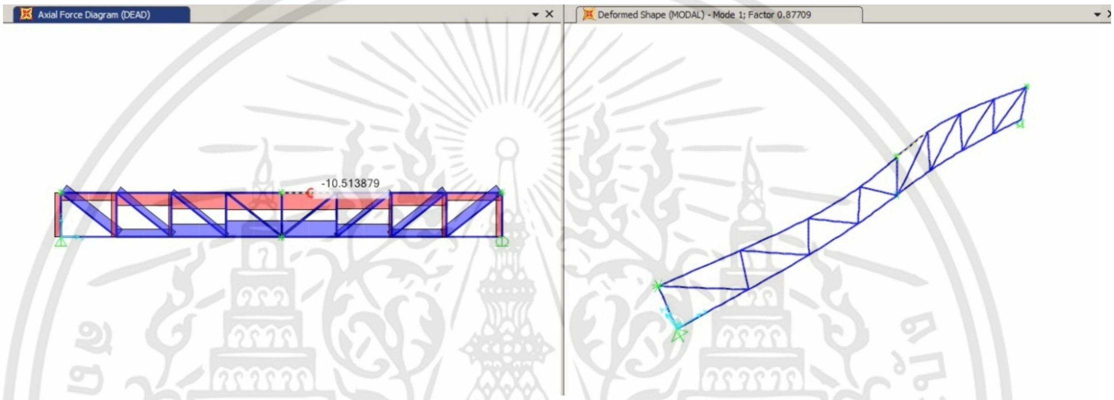



Foot bridge howe span 7.00 เมตร axial force 6365 N factor 1.8631

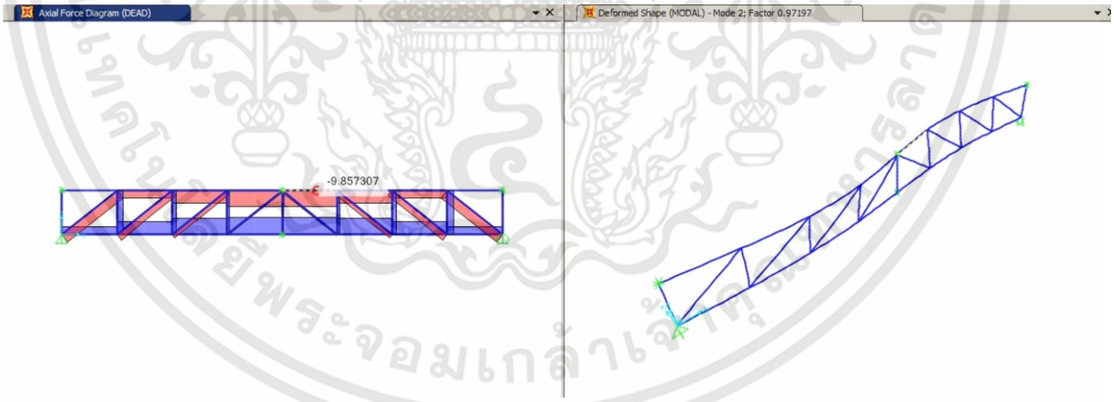
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 4.80 เมตร axial force 7787 N factor 3.15784

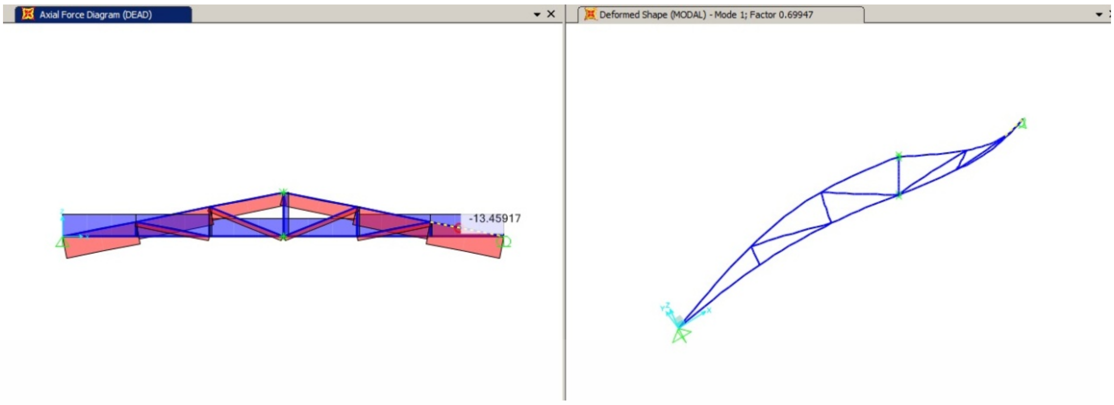



Pratt truss  span 8.00 เมตร axial force 10514 N factor 0.87709

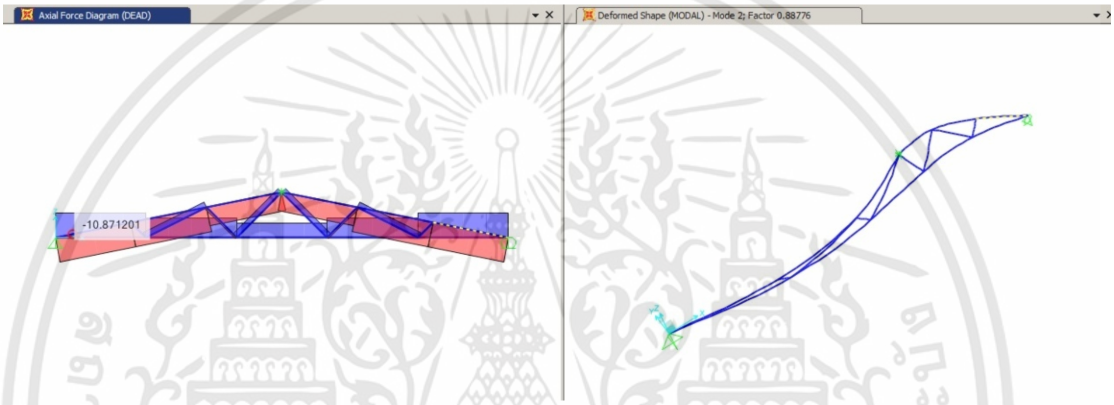



Howe truss  span 8.00 เมตร axial force 9857 N factor 0.97197

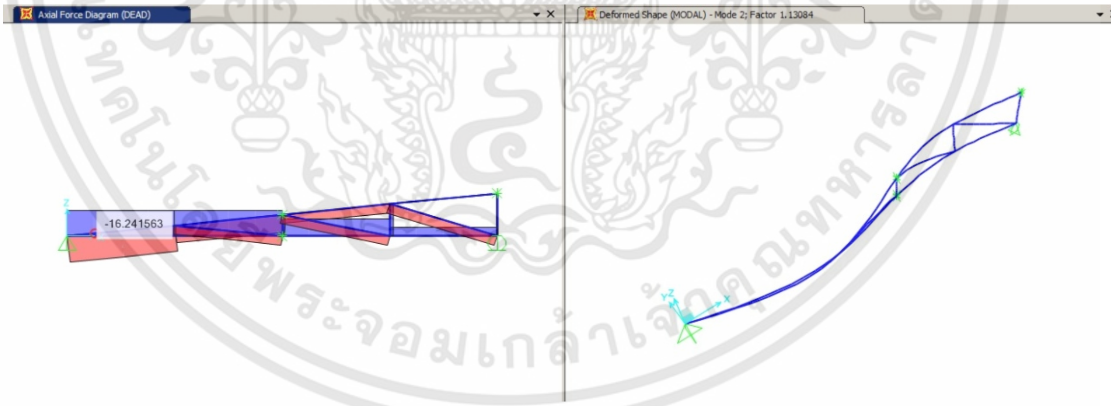
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 8.00 เมตร axial force 13461 N factor 0.69947

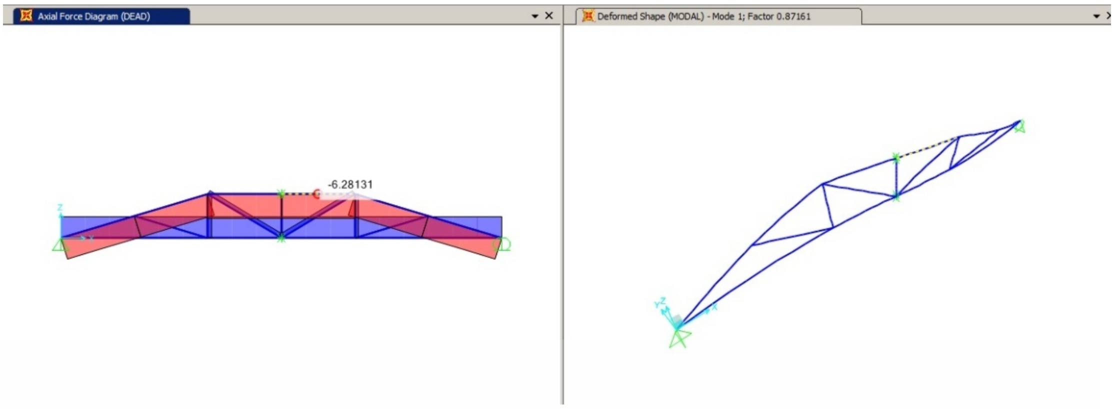



Triangle fink span 8.00 เมตร axial force 10872 N factor 0.88776

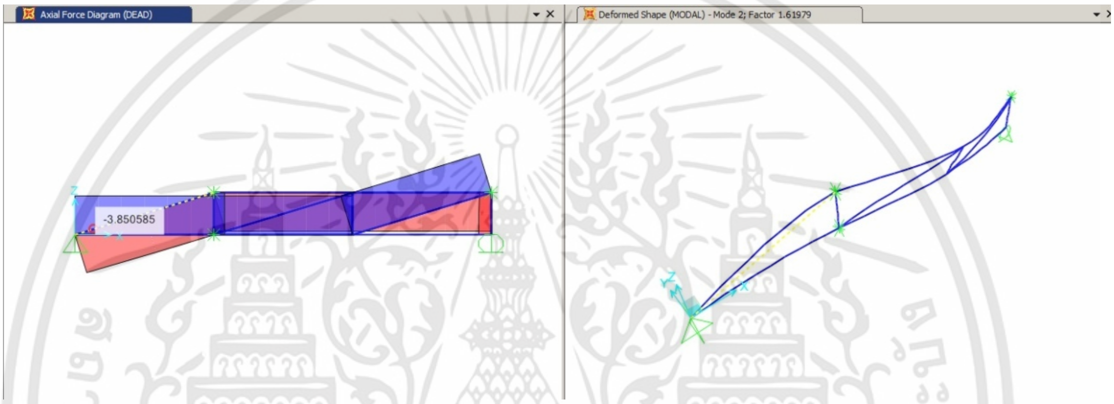



Mono pitch span 8.00 เมตร axial force 16242 N factor 1.13084

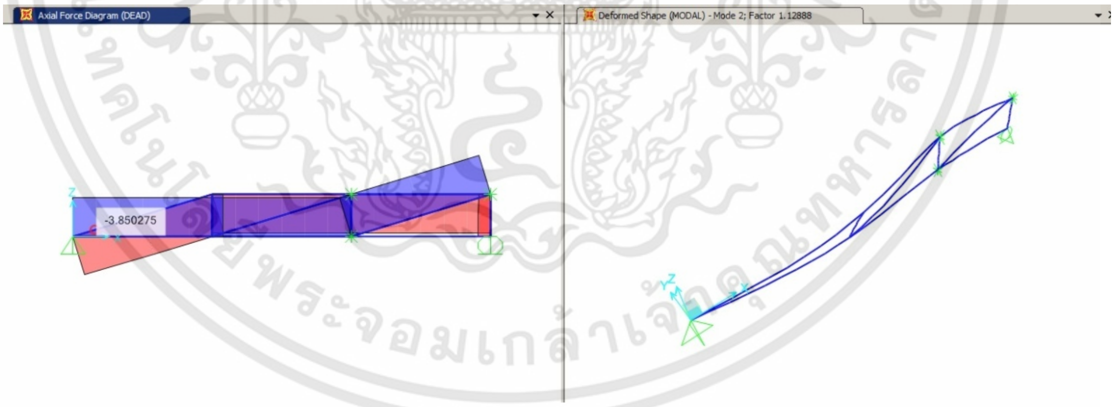
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 8.00 เมตร axial force 6281 N factor 0.87161

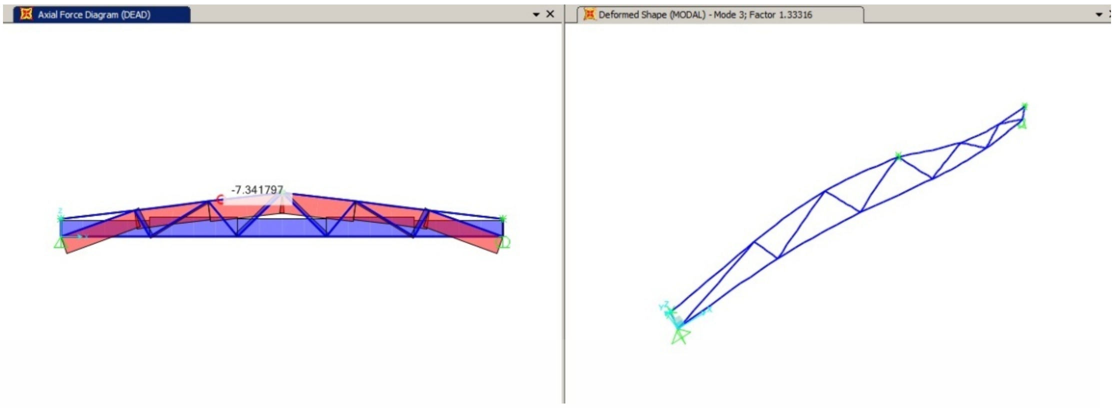



Half hip (front) span 8.00 เมตร axial force 3852 N factor 1.61979

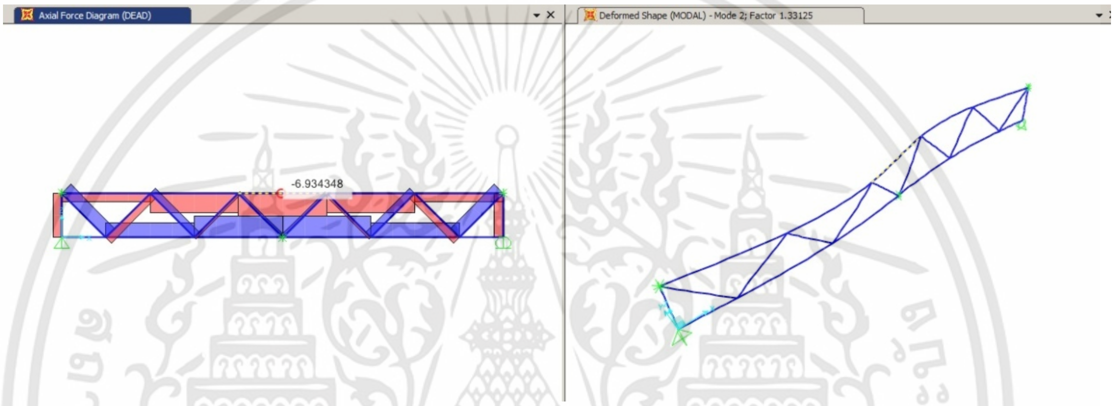



Half hip (rear) span 8.00 เมตร axial force 3852 N factor 1.12888

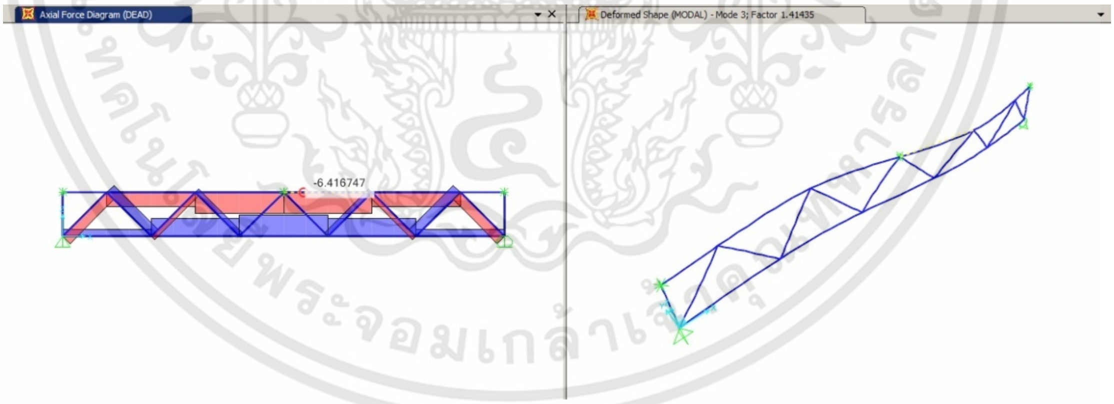
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 8.00 เมตร axial force 7342 N factor 1.33125

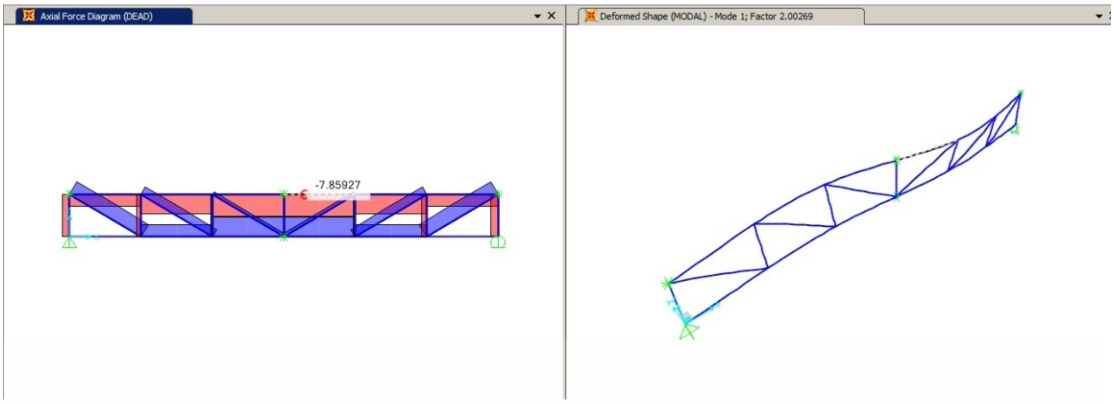



Foot bridge pratt span 8.00 เมตร axial force 6934 N factor 1.33125

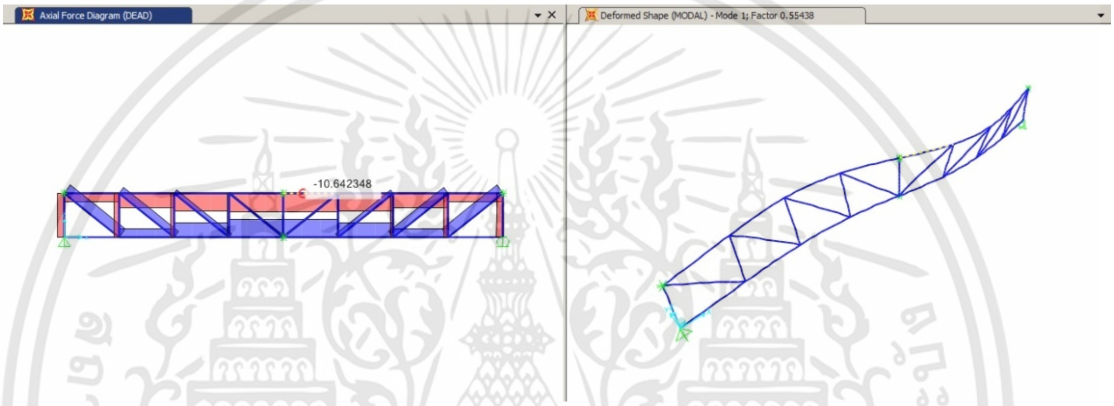



Foot bridge howe span 8.00 เมตร axial force 6417 N factor 1.41435

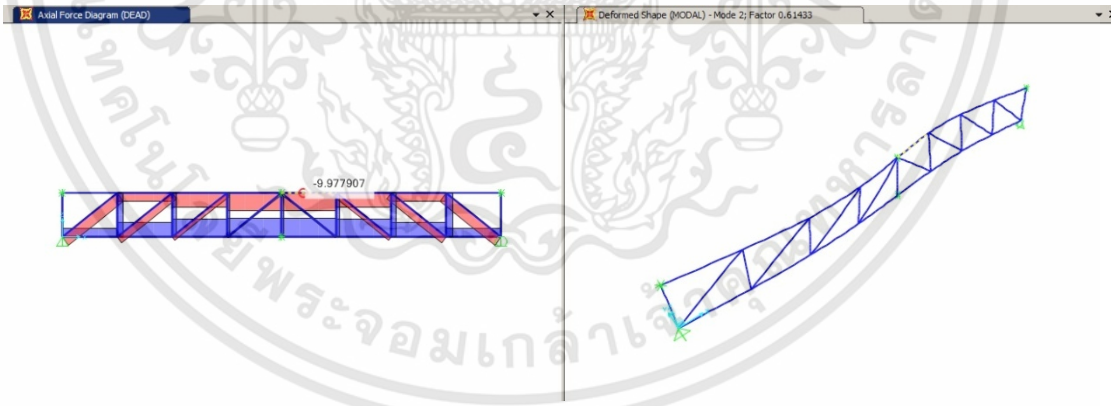
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 6.00 เมตร axial force 7859 N factor 2.00269

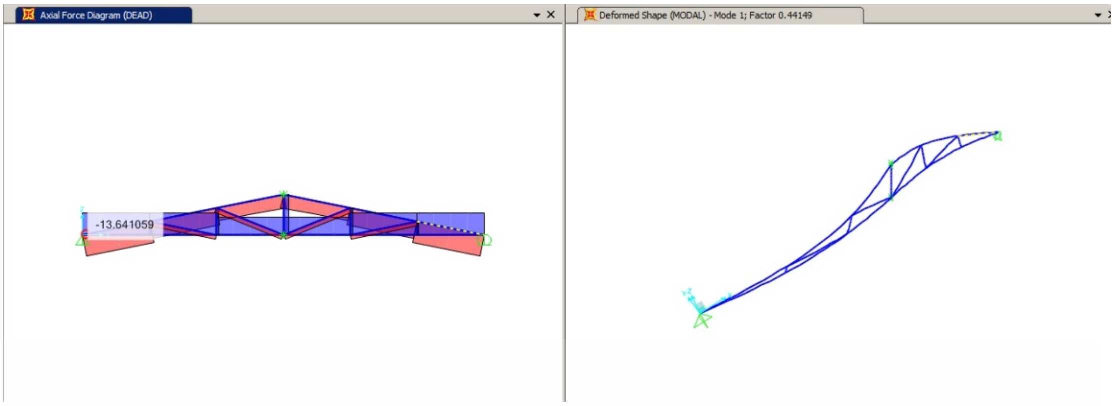



Pratt truss span 10.00 เมตร axial force 10642 N factor 0.55438

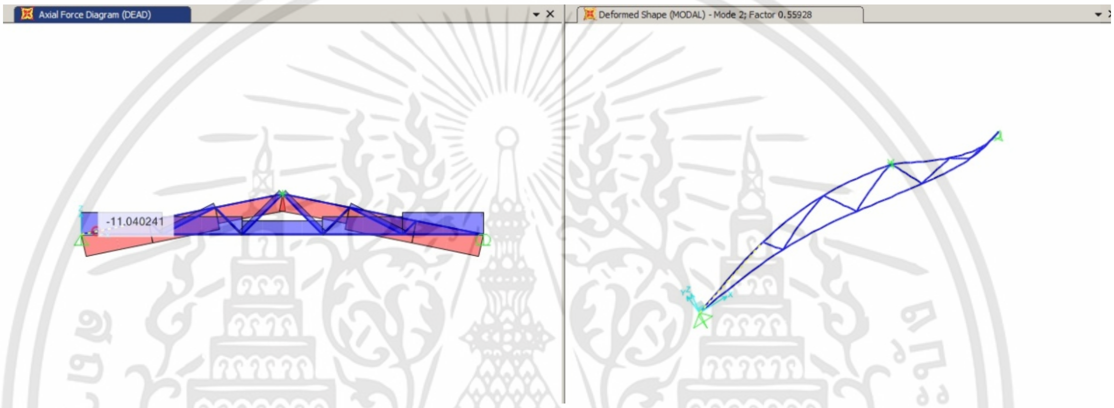



Howe truss span 10.00 เมตร axial force 9978 N factor 0.61433

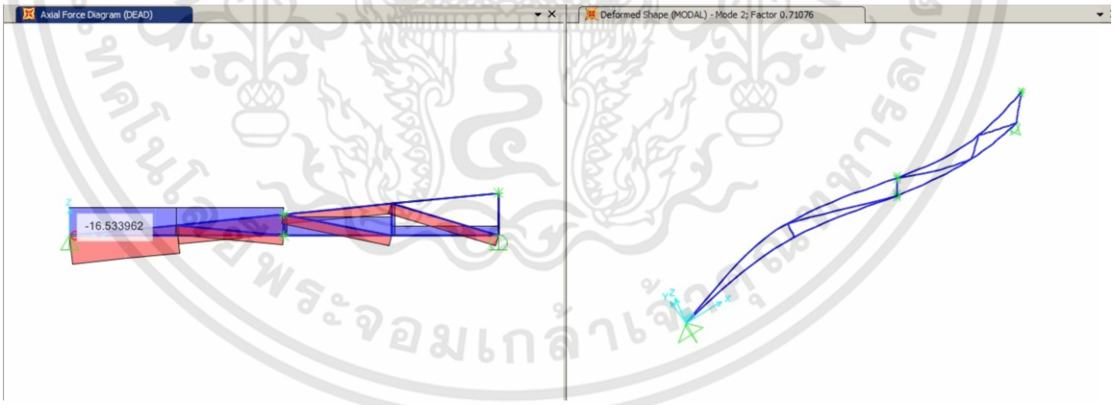
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 10.00 เมตร axial force 13641 N factor 0.44149

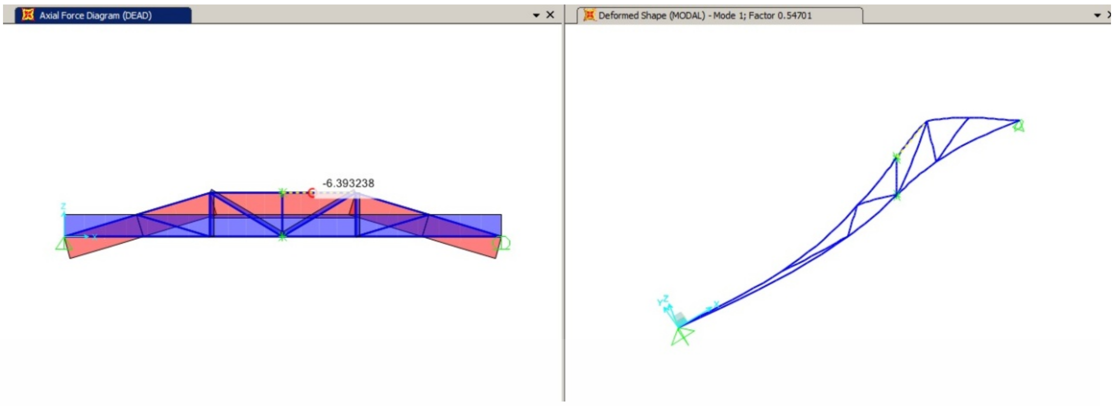



Triangle fink span 10.00 เมตร axial force 11041 N factor 0.55928

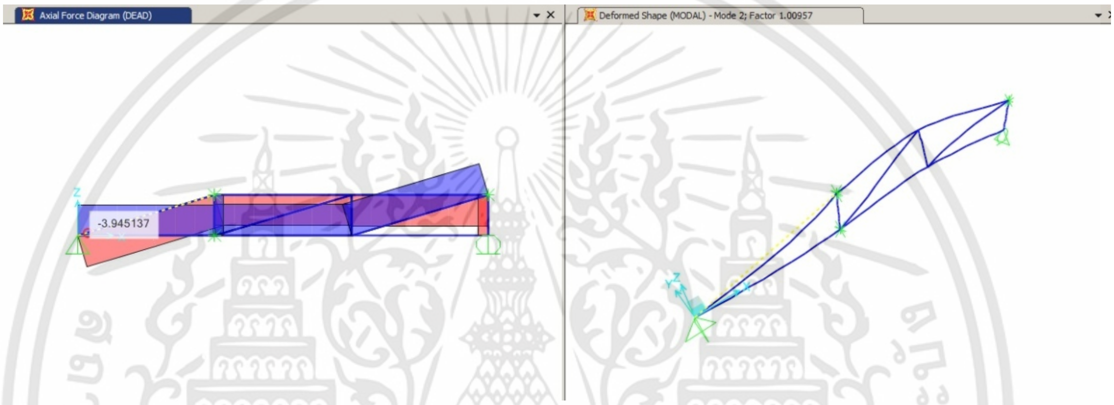



Mono pitch span 10.00 เมตร axial force 16534 N factor 0.71076

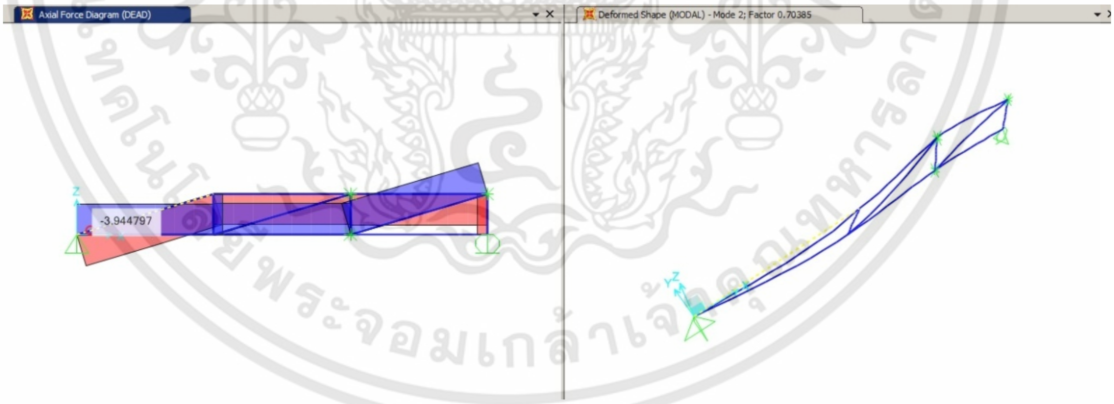
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 10.00 เมตร axial force 6393 N factor 0.54701

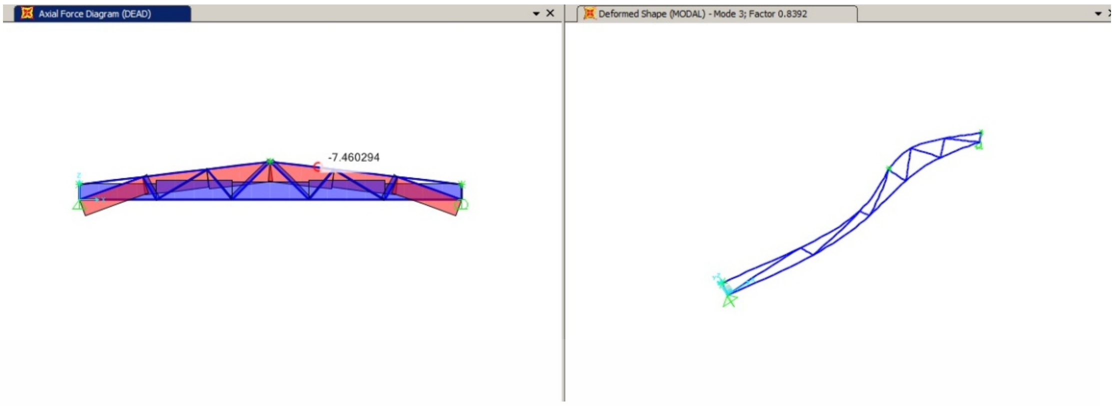



Half hip (front) span 10.00 เมตร axial force 3946 N factor 1.00957

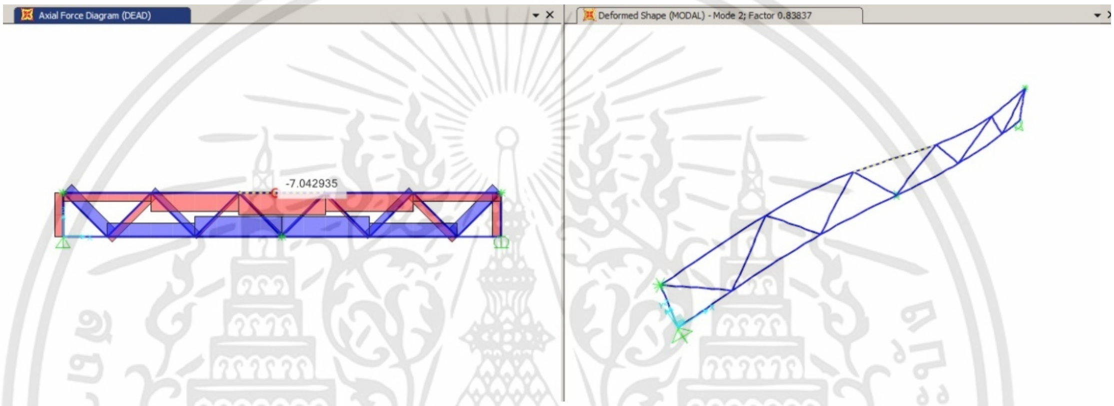



Half hip (rear) span 10.00 เมตร axial force 3946 N factor 0.70385

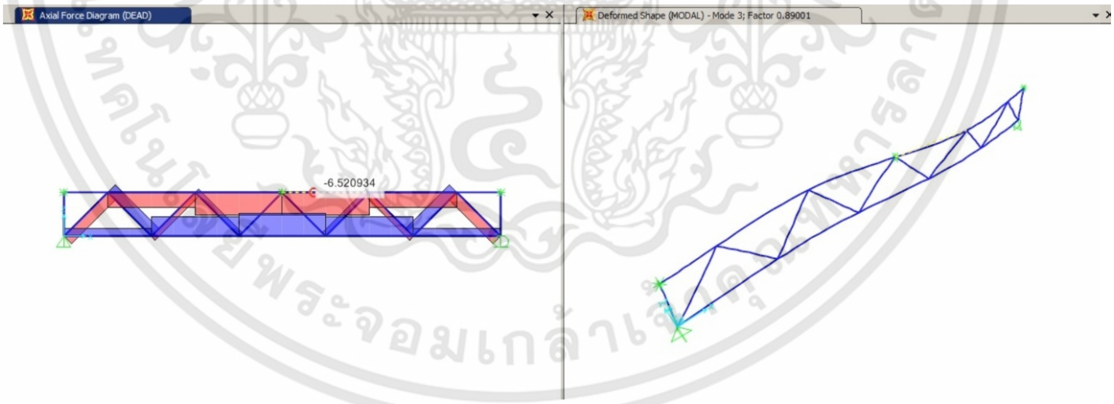
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 10.00 เมตร axial force 7461 N factor 0.8392

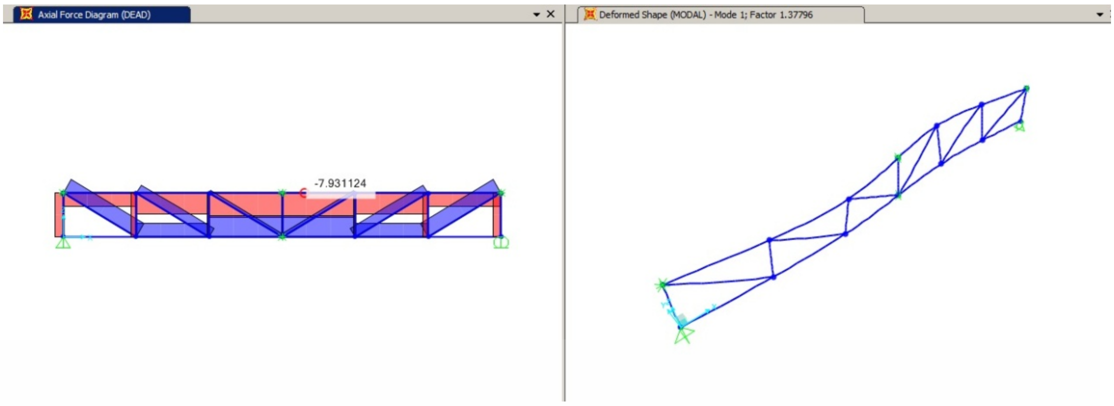



Foot bridge pratt span 10.00 เมตร axial force 7043 N factor 0.83837

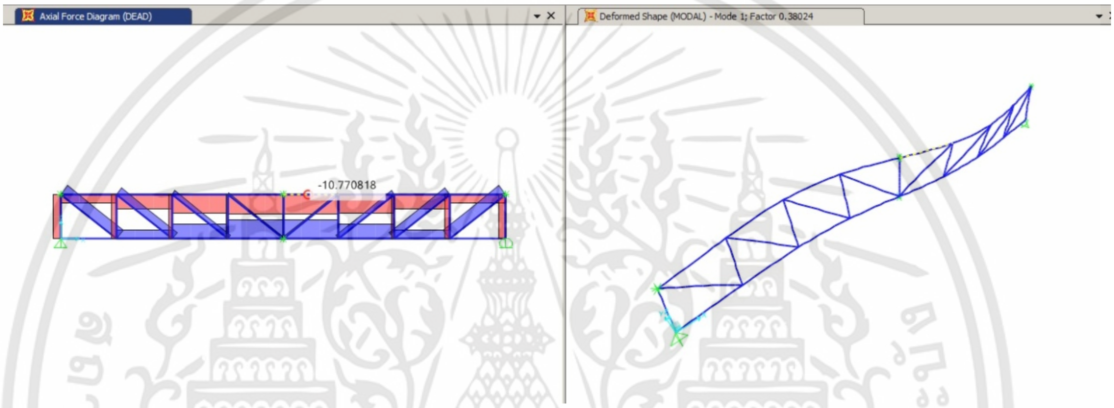



Foot bridge howe span 10.00 เมตร axial force 6521 N factor 0.89001

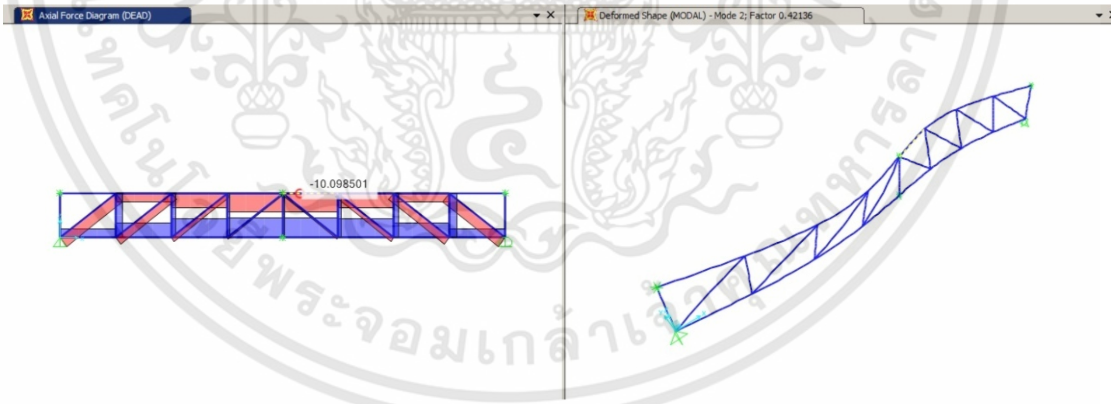
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 7.2 เมตร axial force 7931 N factor 1.37796

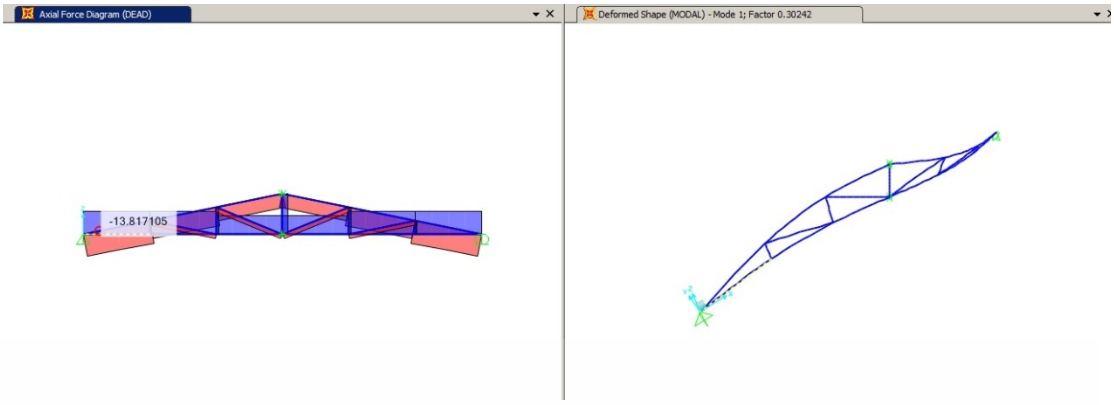



Pratt truss  span 12.00 เมตร axial force 10771 N factor 0.38024

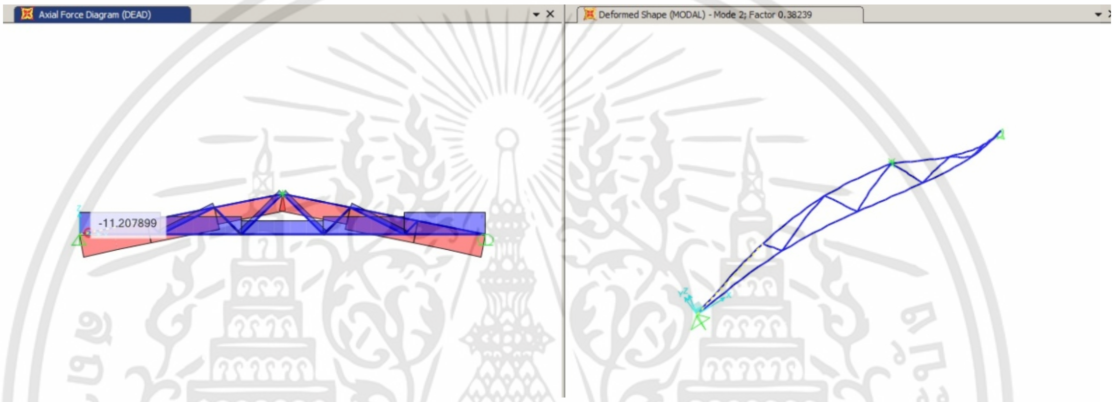



Howe truss  span 12.00 เมตร axial force 10099 N factor 0.42136

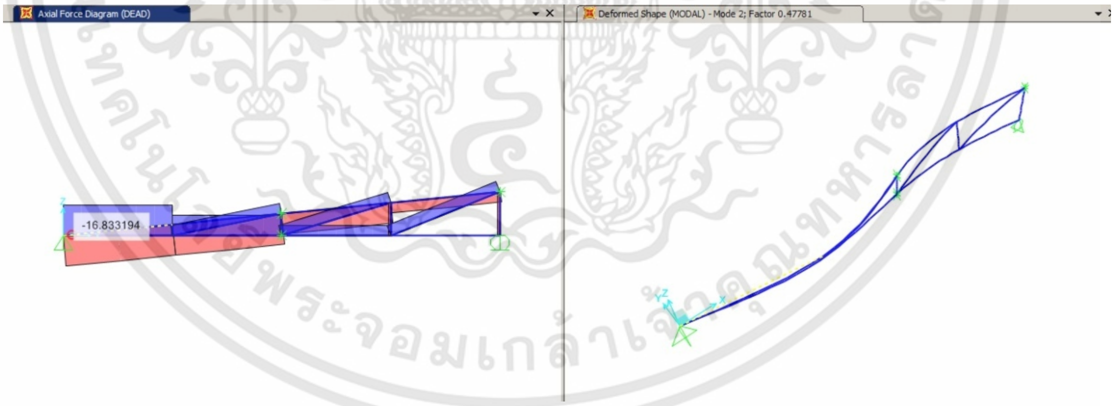
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 12.00 เมตร axial force 13818 N factor 0.30242

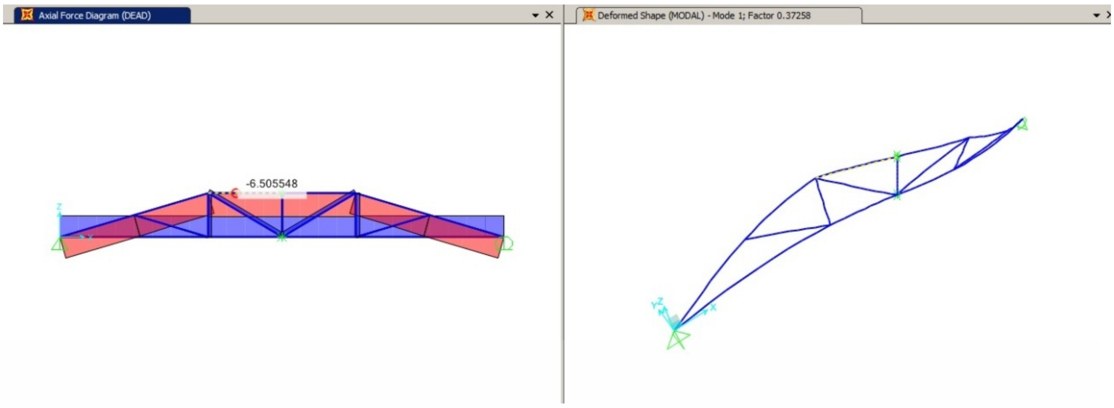



Triangle fink span 12.00 เมตร axial force 11209 N factor 0.38239

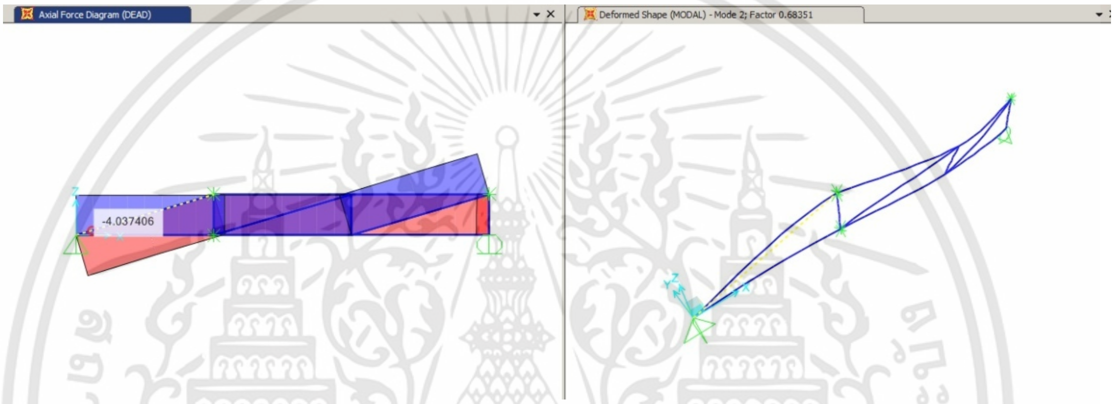



Mono pitch span 12.00 เมตร axial force 16834 N factor 0.47781

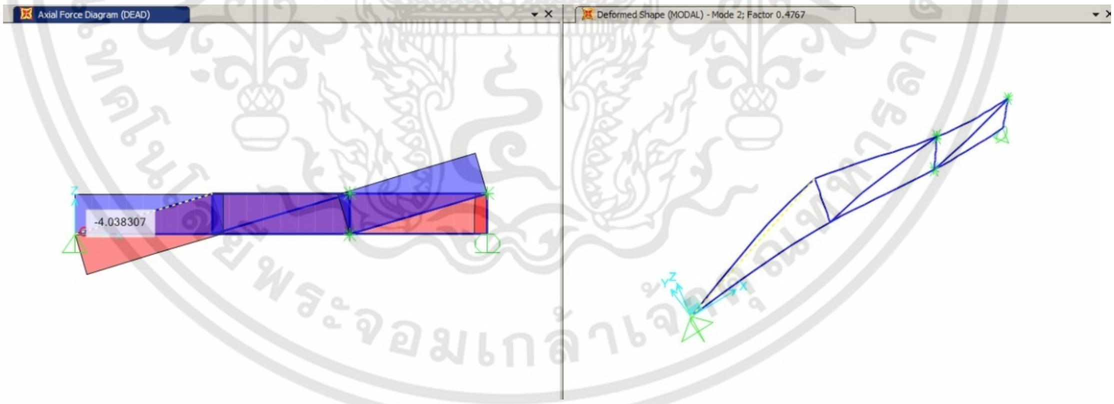
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 12.00 เมตร axial force 6506 N factor 0.37258

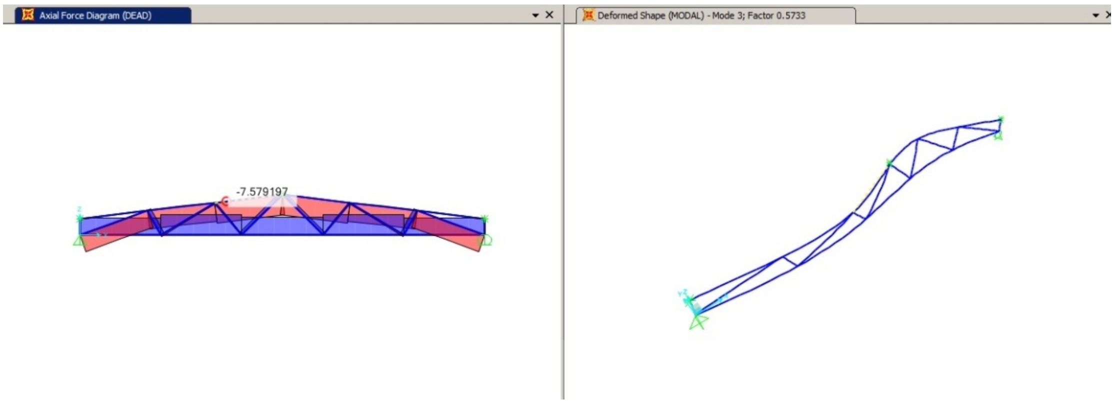



Half hip (front) span 12.00 เมตร axial force 4039 N factor 0.68351

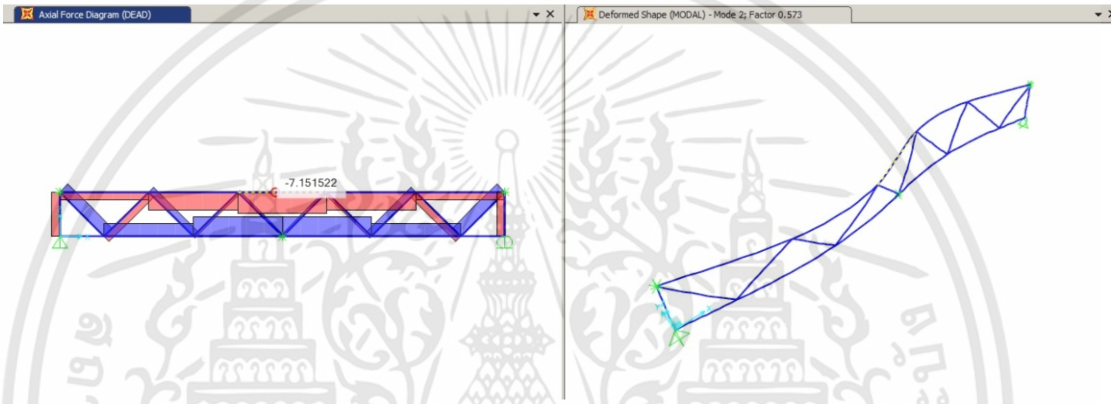



Half hip (rear) span 12.00 เมตร axial force 4039 N factor 0.4767

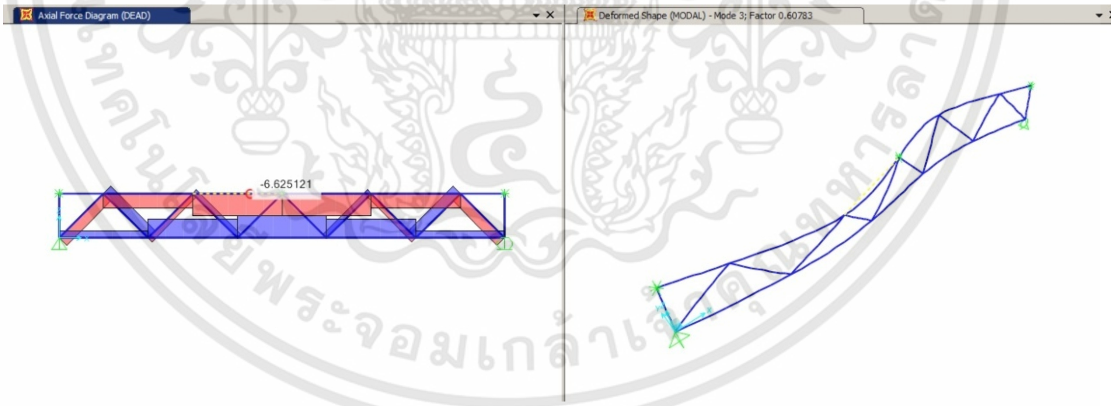
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 12.00 เมตร axial force 7580 N factor 0.5733



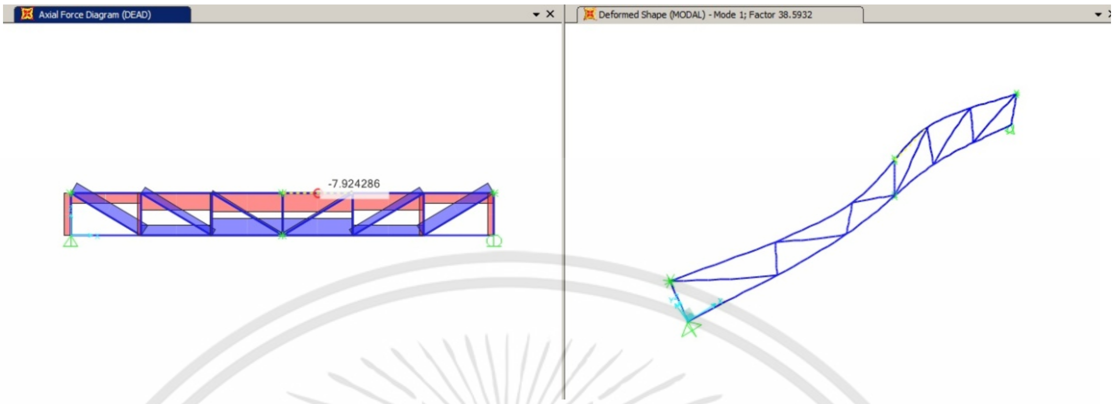

Foot bridge pratt span 12.00 เมตร axial force 7152 N factor 0.573



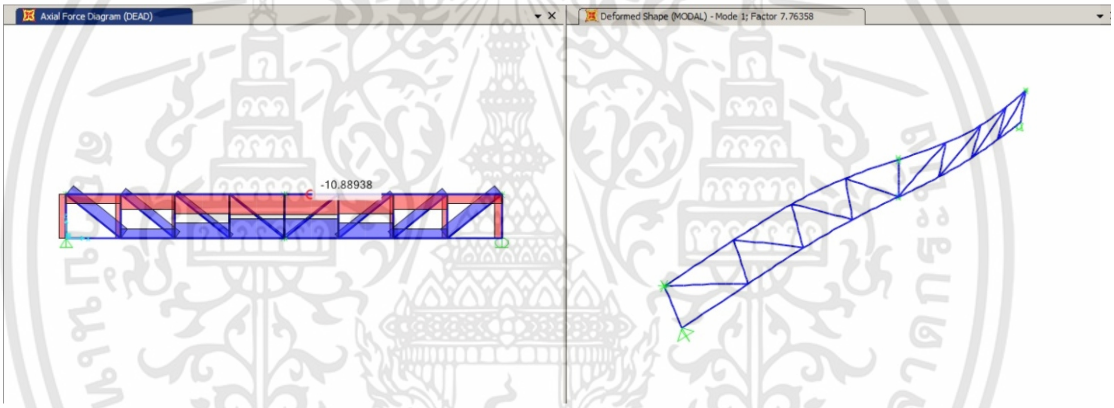

Foot bridge howe span 12.00 เมตร axial force 6625 N factor 0.60783

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

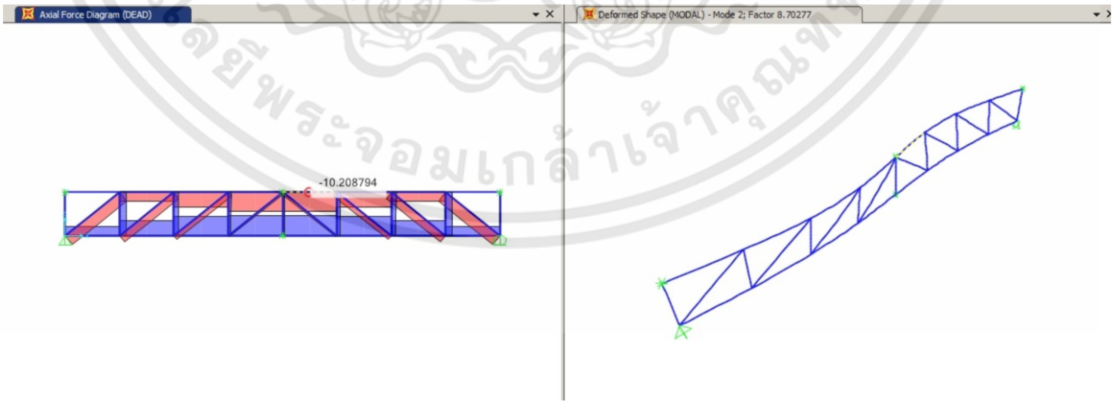
2. กรณีศึกษาที่สองมีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 45x45x2 มิลลิเมตร และ 40x40x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ




Pratt truss span 3.6 เมตร axial force 7924 N factor 38.5932

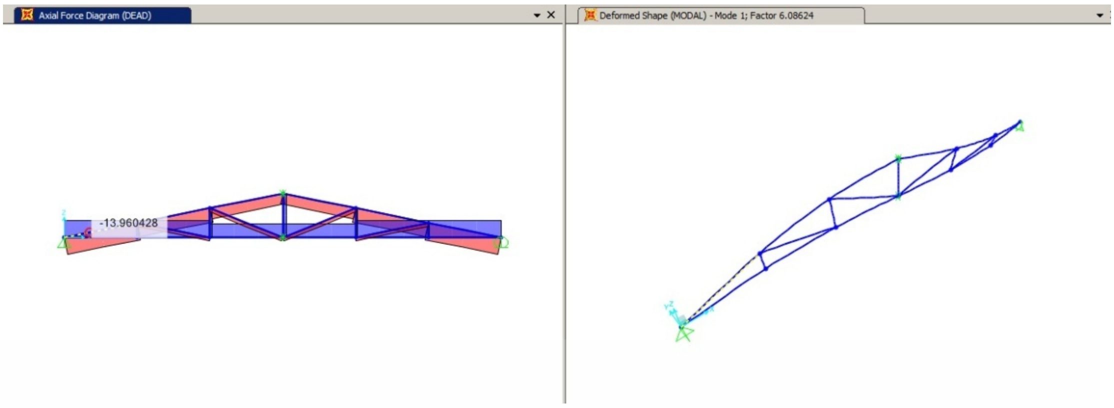



Pratt truss span 7.00 เมตร axial force 10889 N factor 7.76358

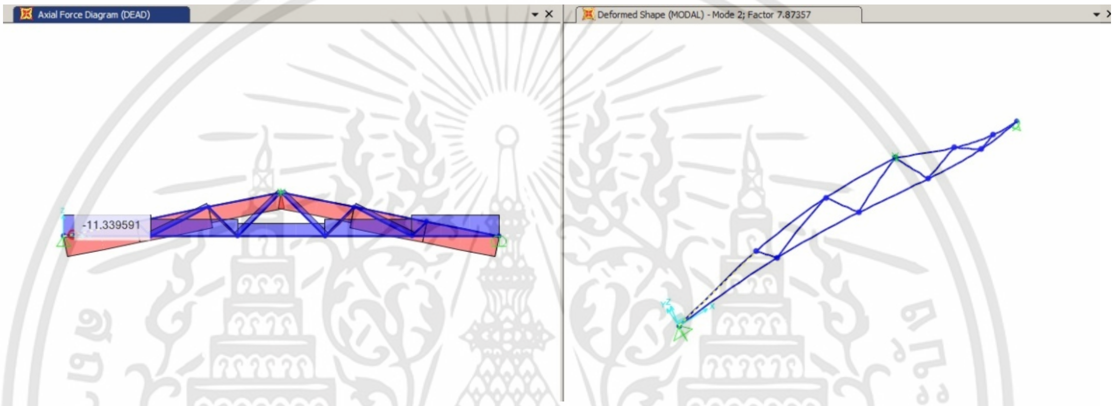



Howe truss span 7.00 เมตร axial force 10209 N factor 8.70277

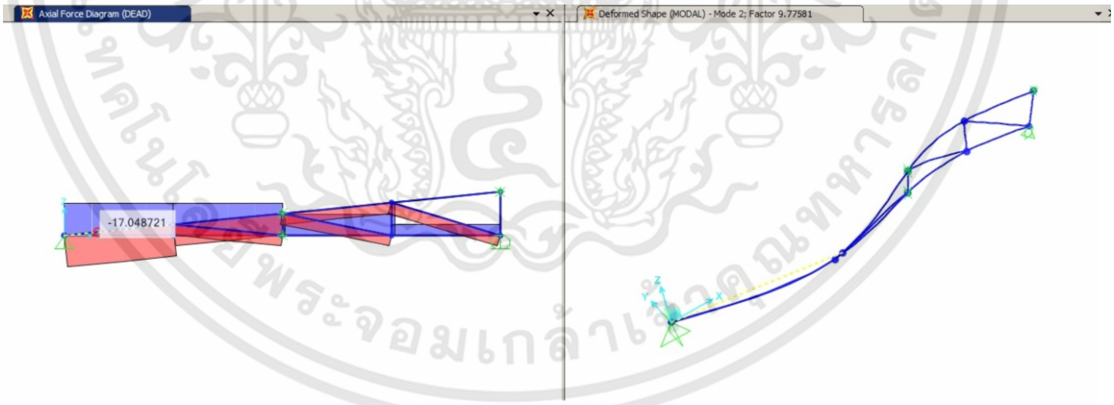
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 7.00 เมตร axial force 13963 N factor 6.08624

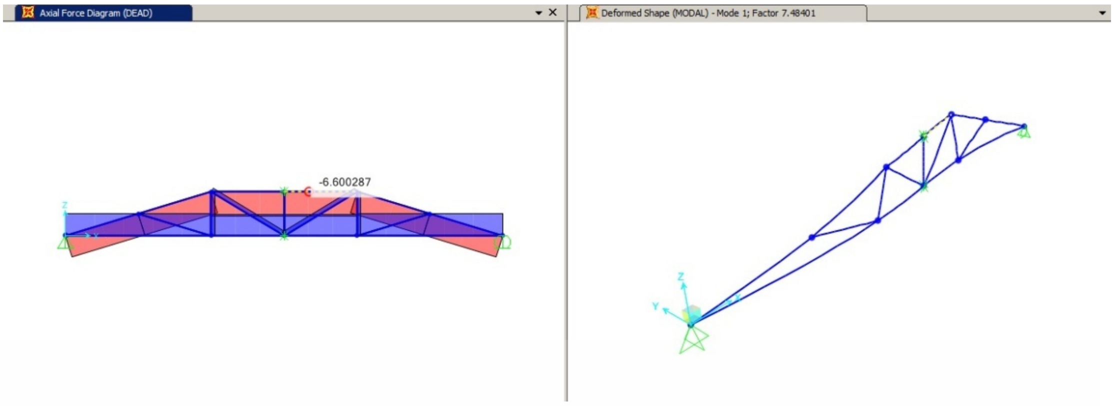



Triangle fink span 7.00 เมตร axial force 11342 N factor 7.87357

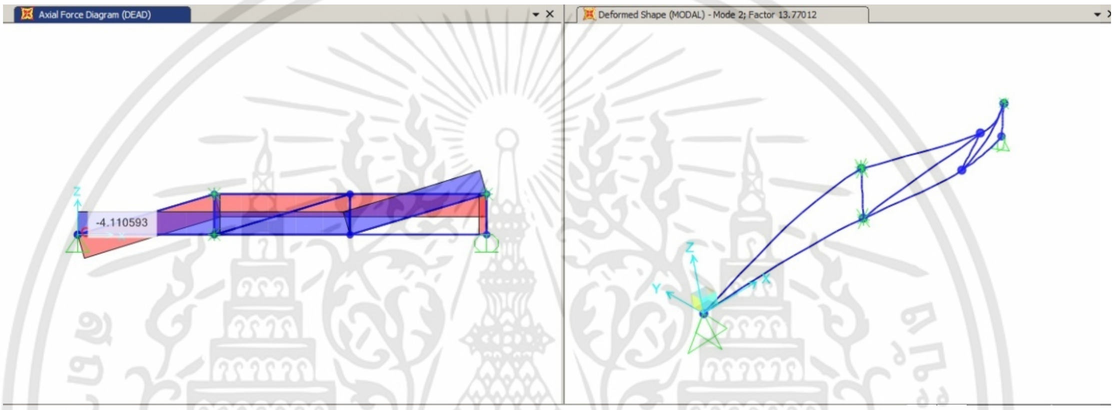



Mono pitch span 7.00 เมตร axial force 17050 N factor 9.77581

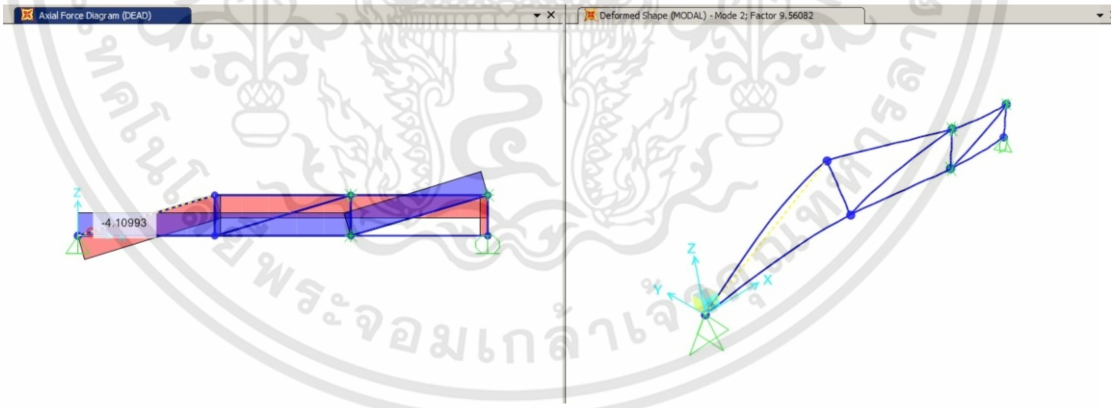
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 7.00 เมตร axial force 6600 N factor 7.48401

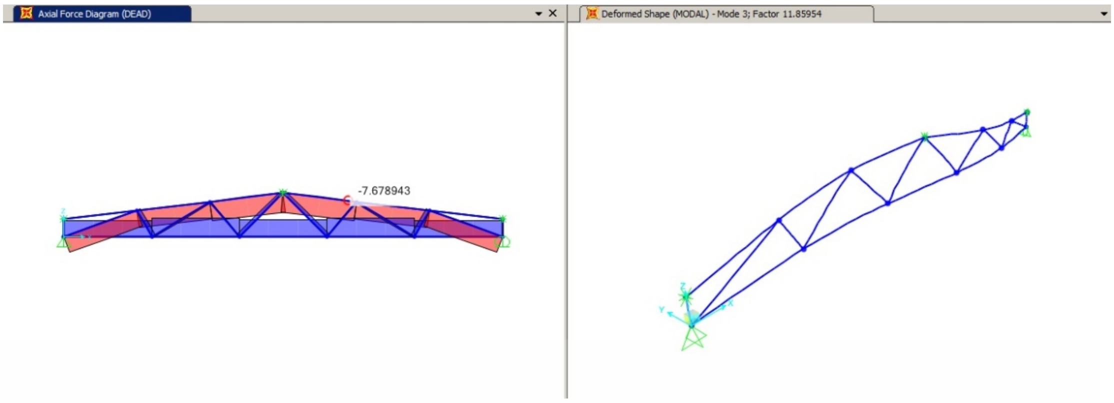



Half hip (front) span 7.00 เมตร axial force 4112 N factor 13.77012

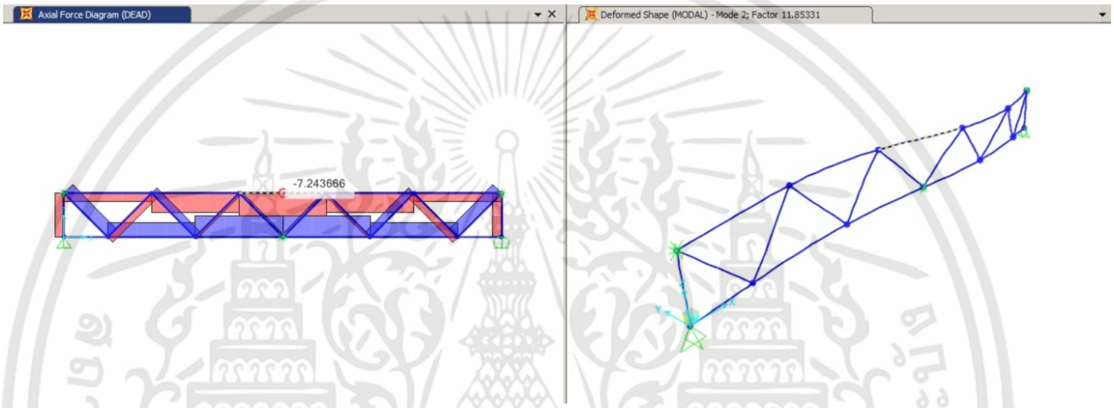



Half hip (rear) span 7.00 เมตร axial force 4112 N factor 9.56082

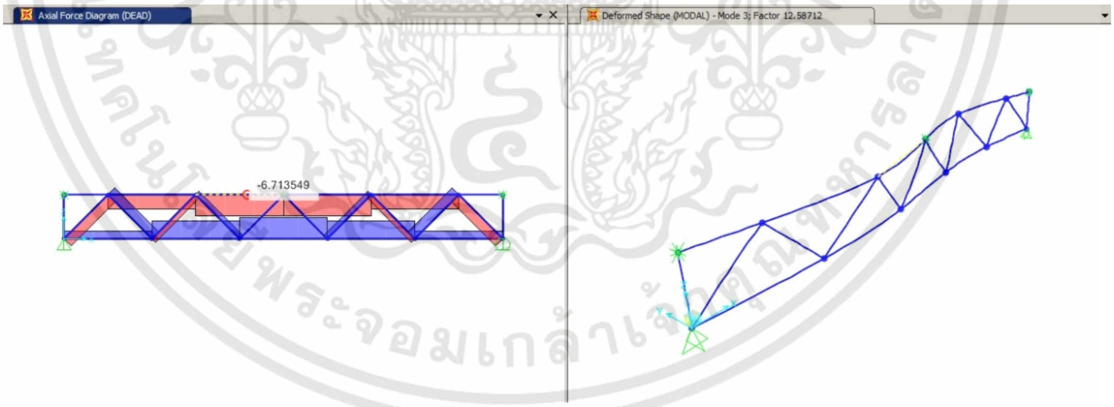
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 7.00 เมตร axial force 7679 N factor 11.85954

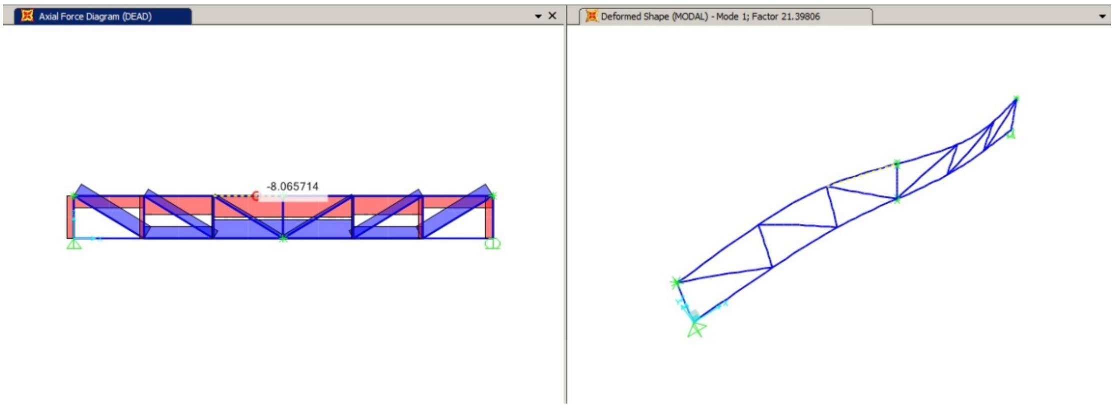



Foot bridge pratt span 7.00 เมตร axial force 7244 N factor 11.85331

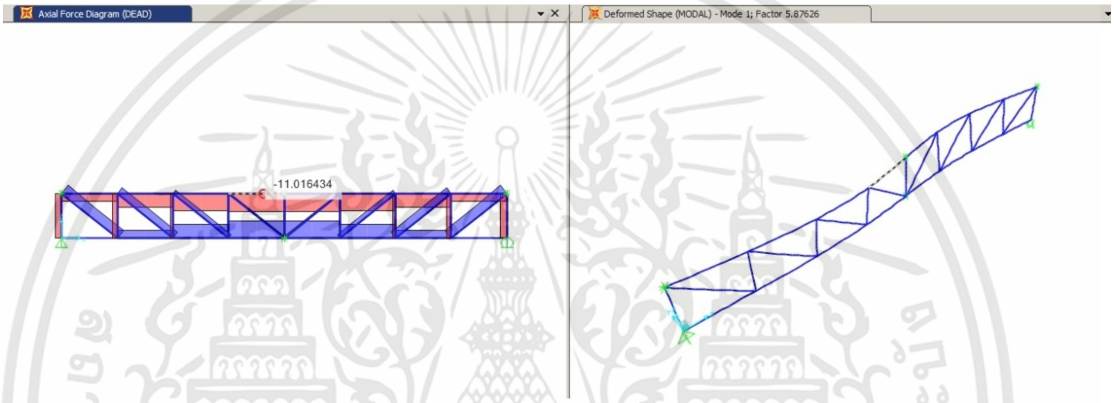



Foot bridge howe span 7.00 เมตร axial force 6714 N factor 12.58712

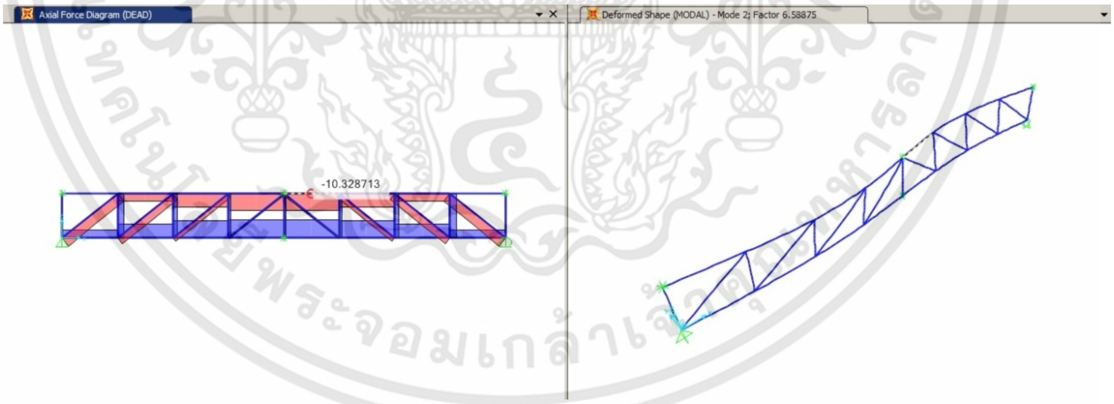
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 4.80 เมตร axial force 8066 N factor 21.39806

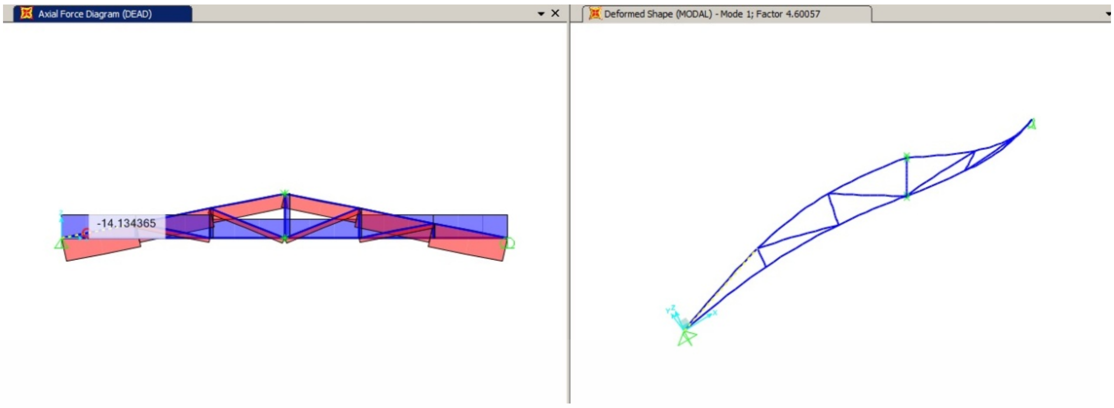



Pratt truss span 8.00 เมตร axial force 11016 N factor 5.87626

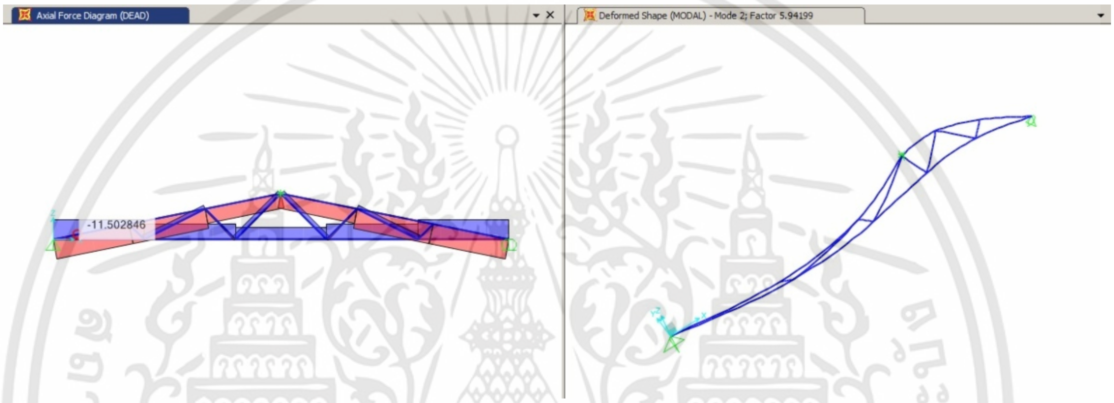



Howe truss span 8.00 เมตร axial force 10329 N factor 6.58875

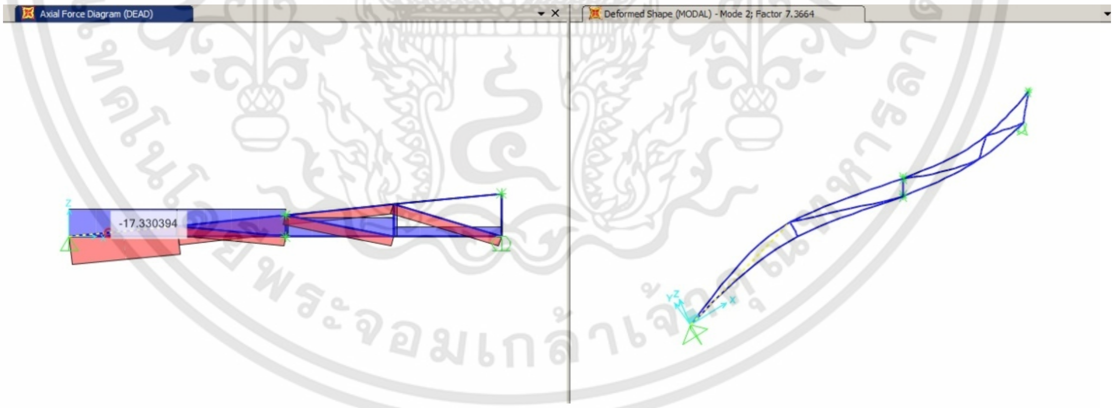
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 8.00 เมตร axial force 14137 N factor 4.60057

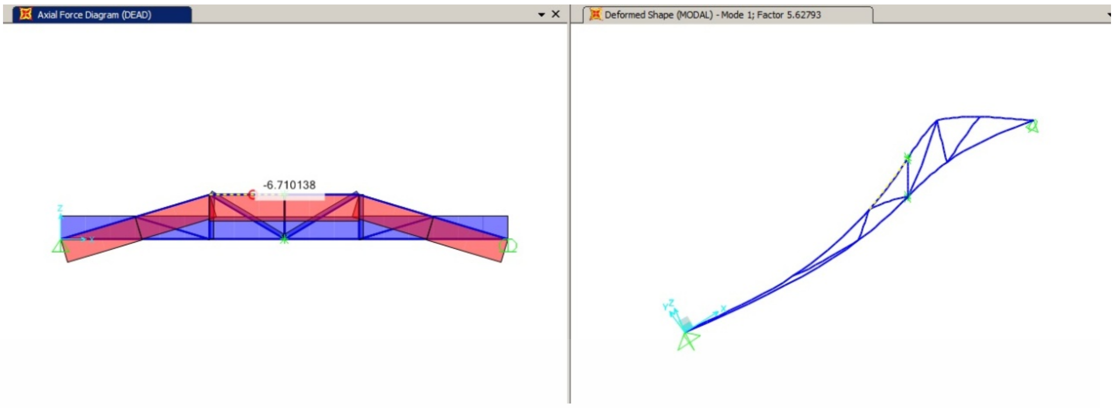



Triangle fink span 8.00 เมตร axial force 11505 N factor 5.94199

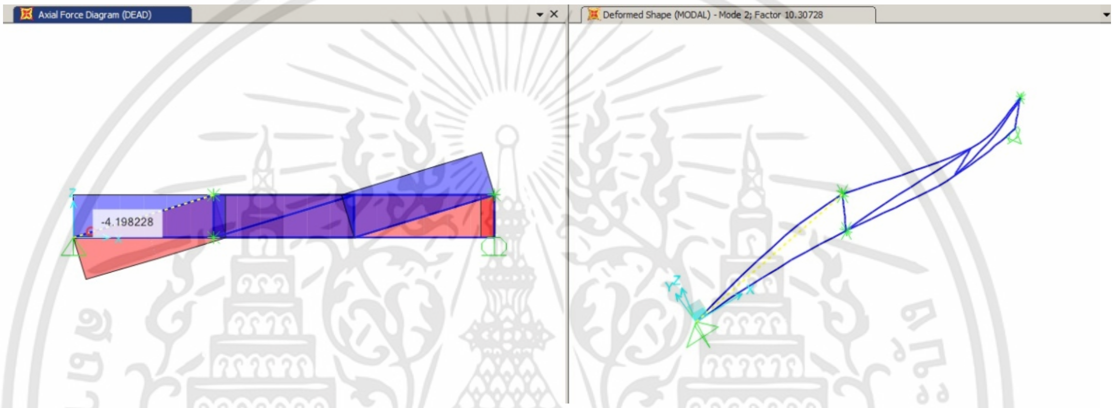



Mono pitch span 8.00 เมตร axial force 17332 N factor 7.3664

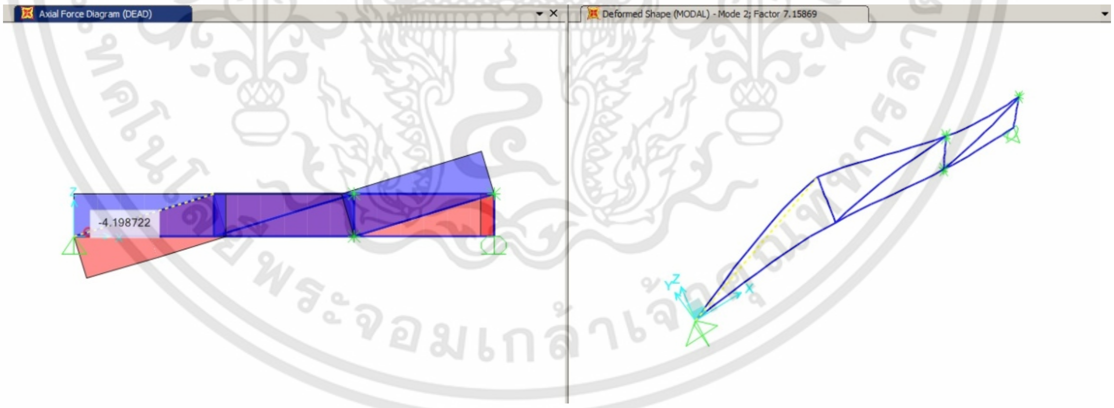
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 8.00 เมตร axial force 6710 N factor 5.62793

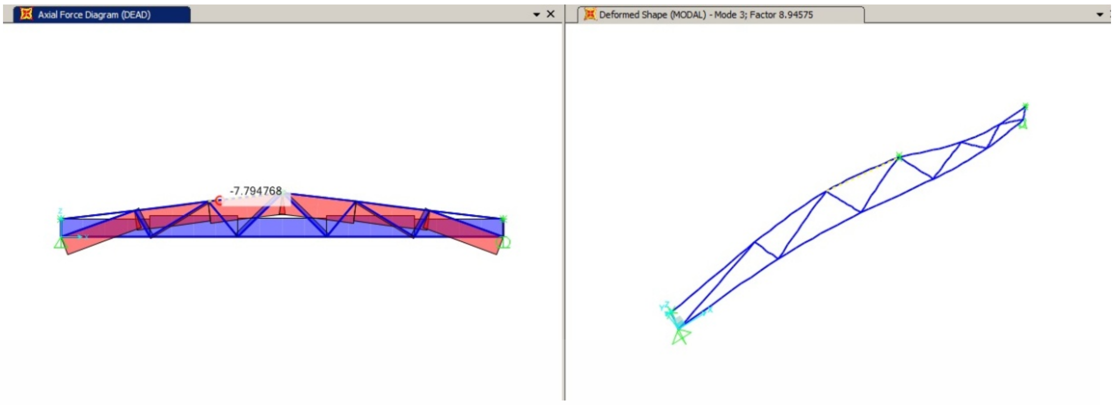



Half hip (front) span 8.00 เมตร axial force 4201 N factor 10.30728

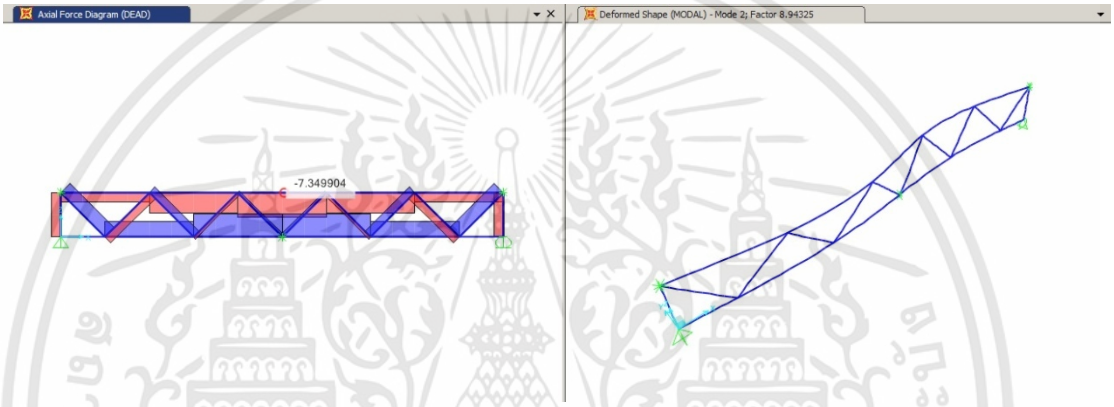



Half hip (rear) span 8.00 เมตร axial force 4201 N factor 7.15869

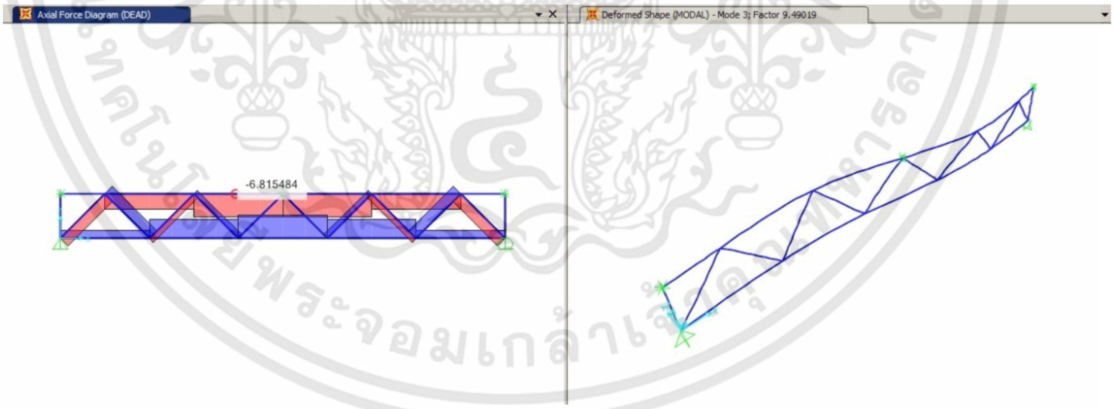
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 8.00 เมตร axial force 7795 N factor 8.94575

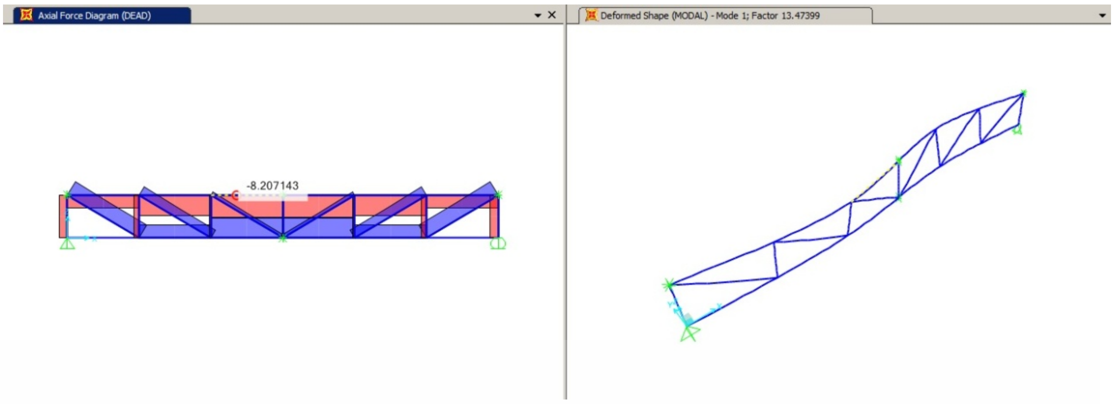



Foot bridge pratt span 8.00 เมตร axial force 7350 N factor 8.94325

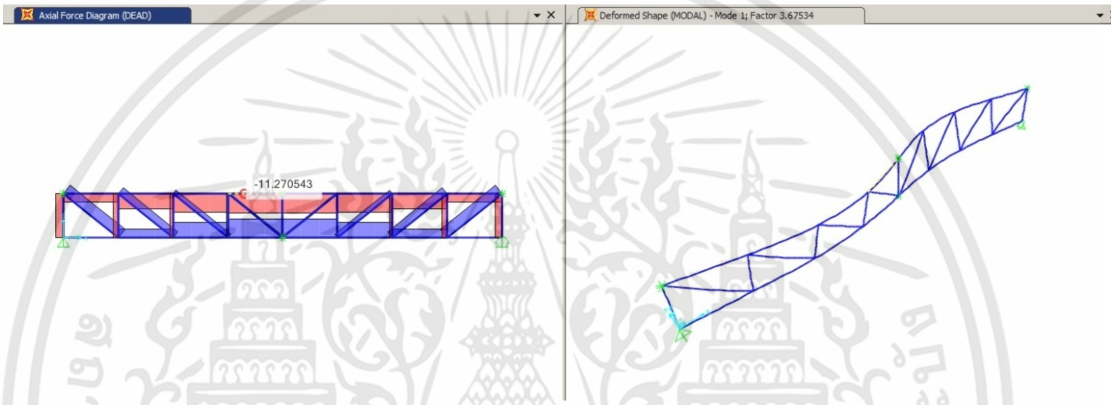



Foot bridge howe span 8.00 เมตร axial force 6815 N factor 9.49019

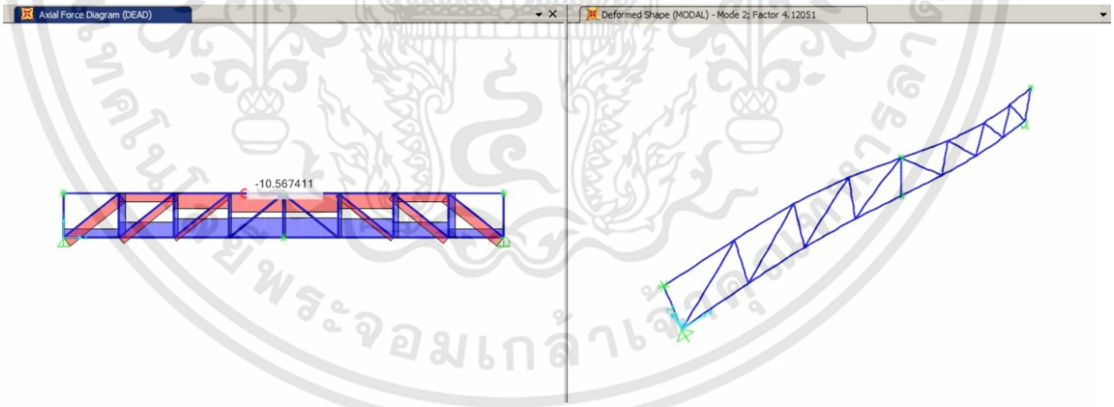
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 6 เมตร axial force 8207 N factor 13.47399

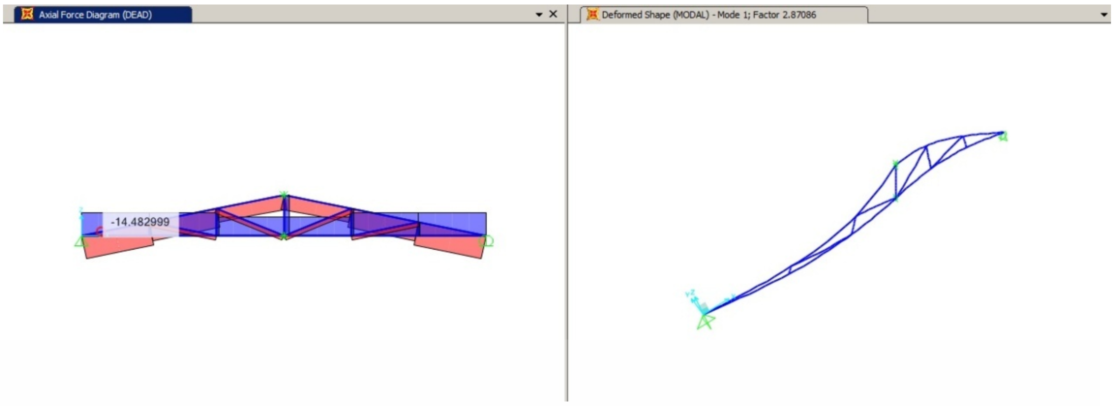



Pratt truss  span 10.00 เมตร axial force 11271 N factor 3.67534

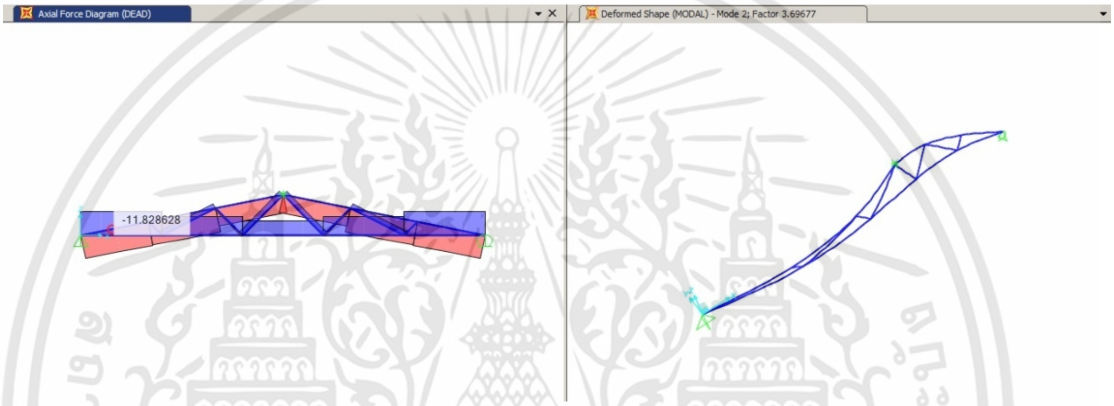



Howe truss  span 10.00 เมตร axial force 10567 N factor 4.12051

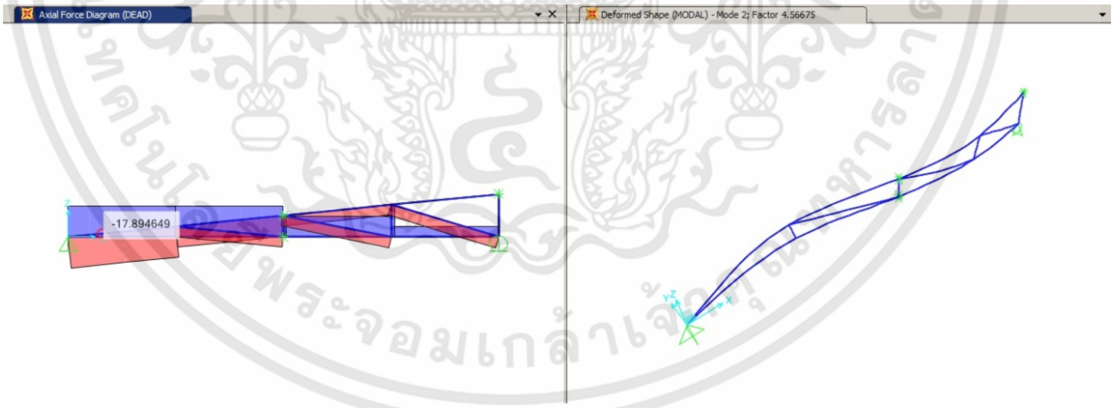
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 10.00 เมตร axial force 14486 N factor 2.87086

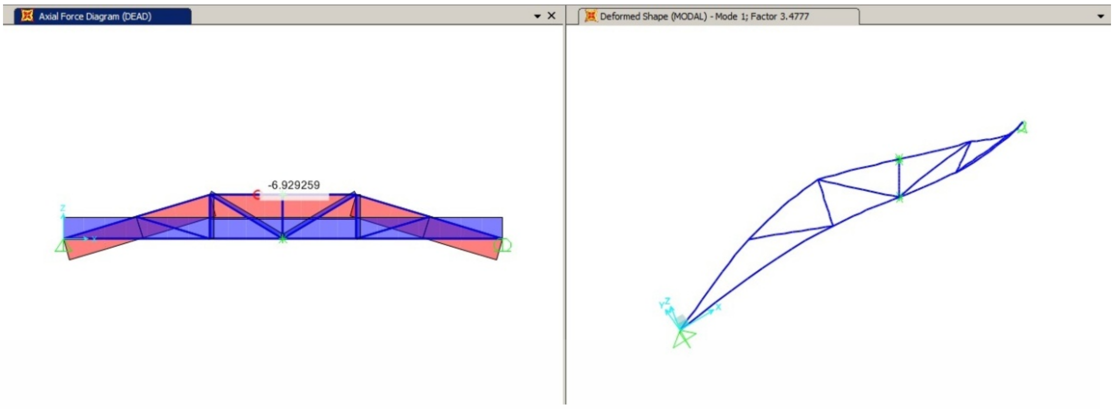



Triangle fink span 10.00 เมตร axial force 11833 N factor 3.69677

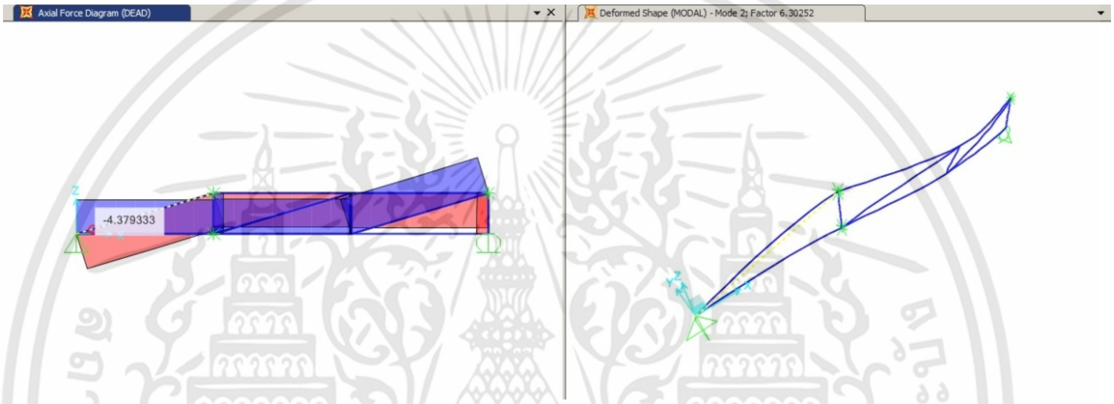



Mono pitch span 10.00 เมตร axial force 17897 N factor 4.56675

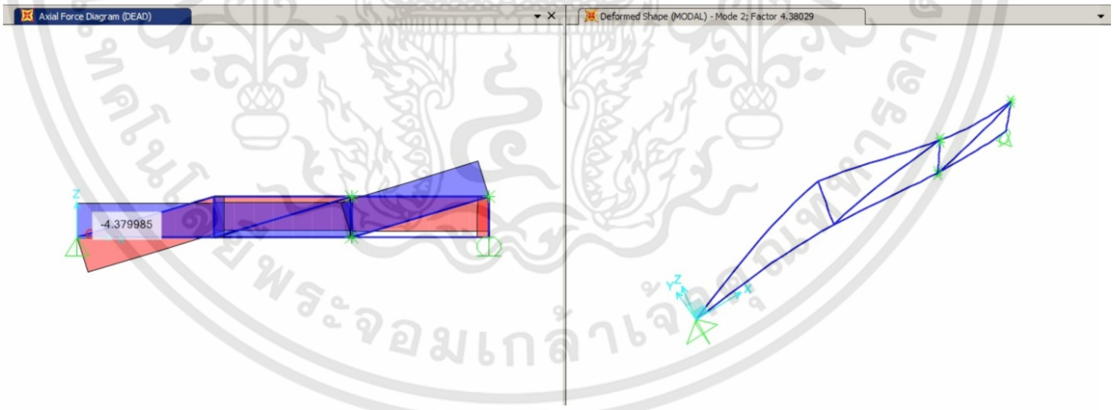
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 10.00 เมตร axial force 6929 N factor 3.4777

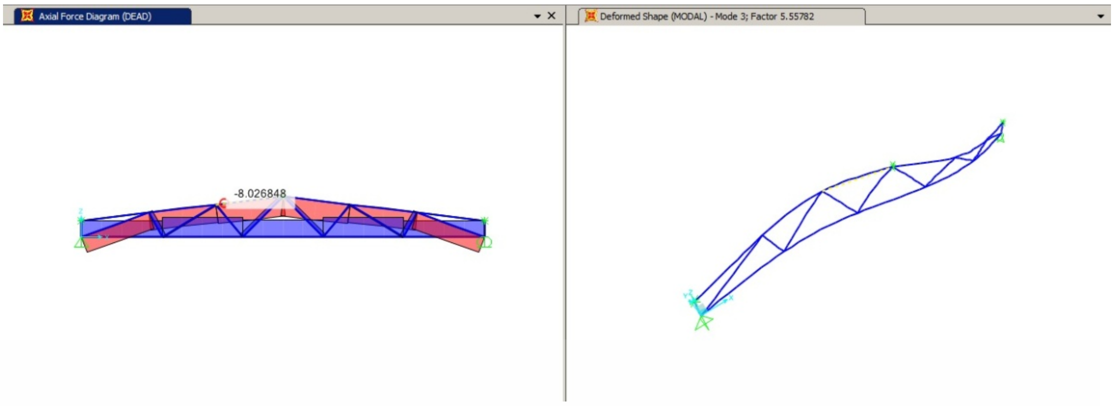



Half hip (front) span 10.00 เมตร axial force 4382 N factor 6.30252

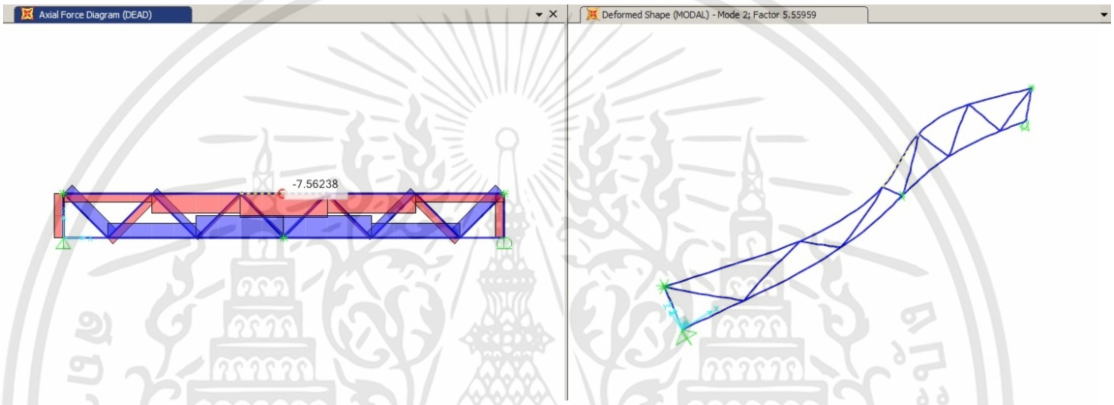



Half hip (rear) span 10.00 เมตร axial force 4382 N factor 4.38029

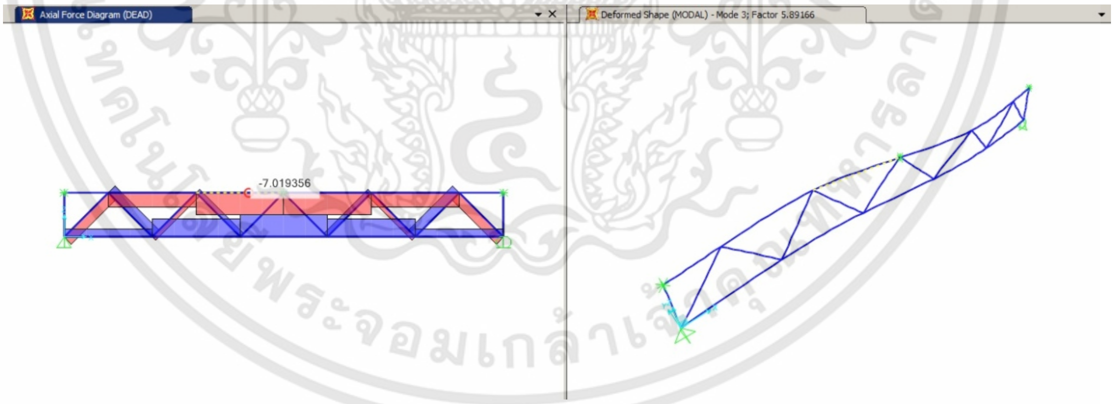
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 10.00 เมตร axial force 8028 N factor 5.55782

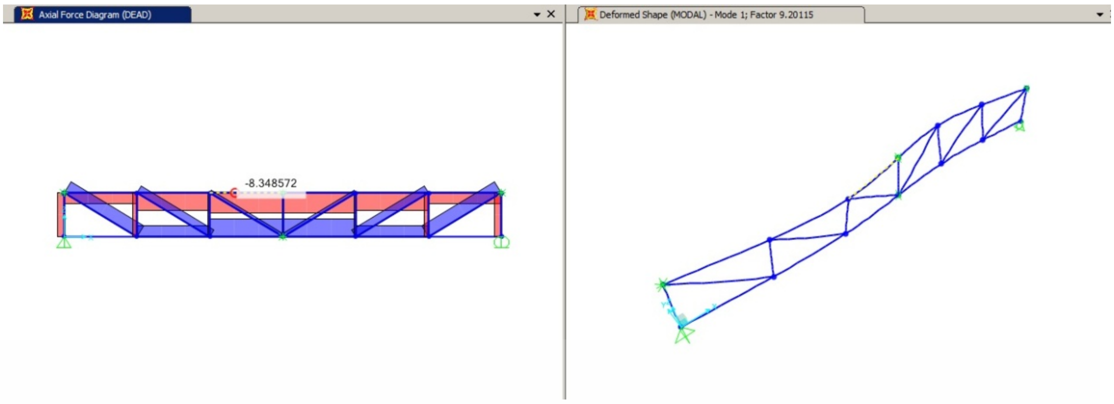



Foot bridge pratt span 10.00 เมตร axial force 7562 N factor 5.55959

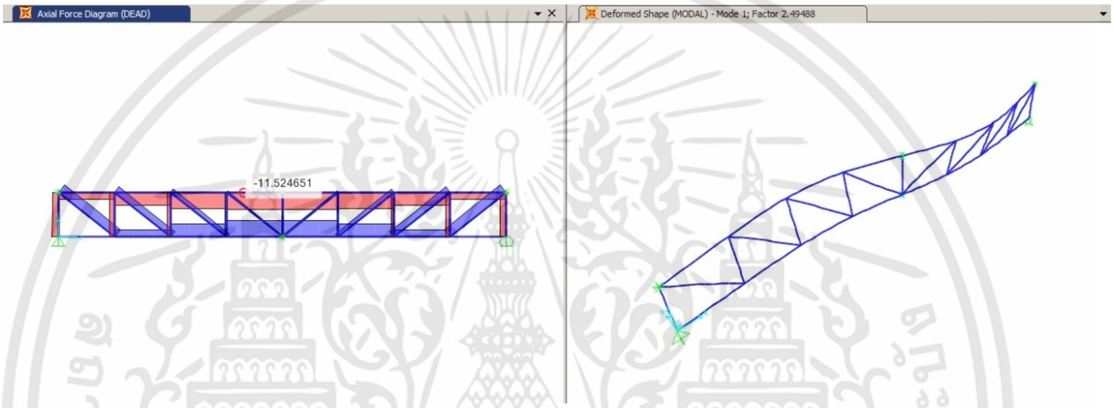



Foot bridge howe span 10.00 เมตร axial force 7019 N factor 5.89166

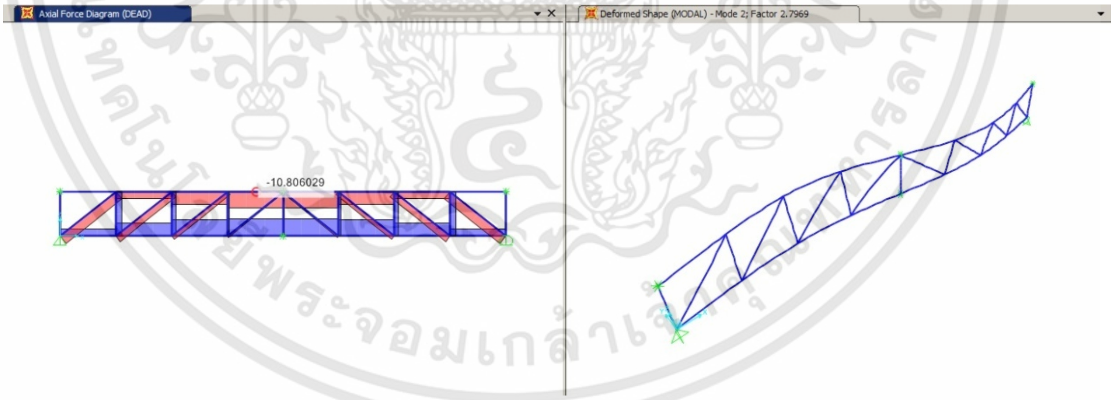
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 7.2 เมตร axial force 8349 N factor 9.20115

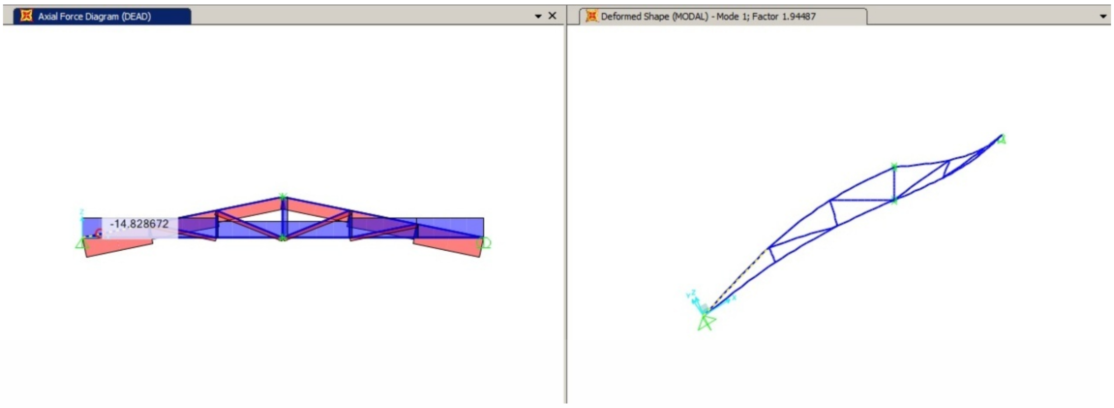



Pratt truss  span 12.00 เมตร axial force 11525 N factor 2.49488

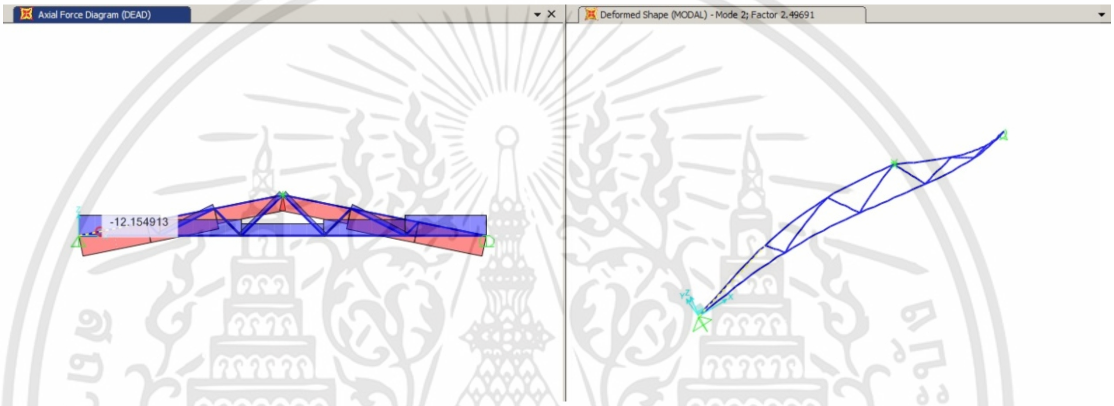



Howe truss  span 12.00 เมตร axial force 10806 N factor 2.7969

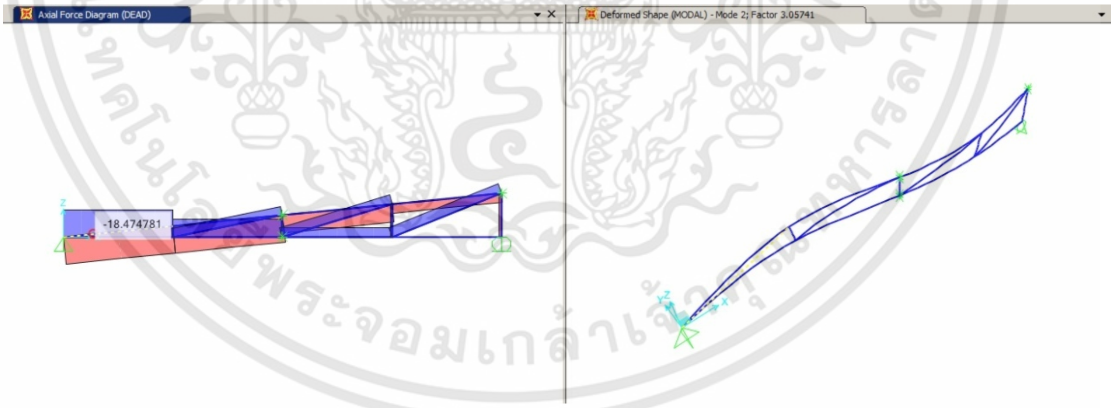
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 12.00 เมตร axial force 14832 N factor 1.94487

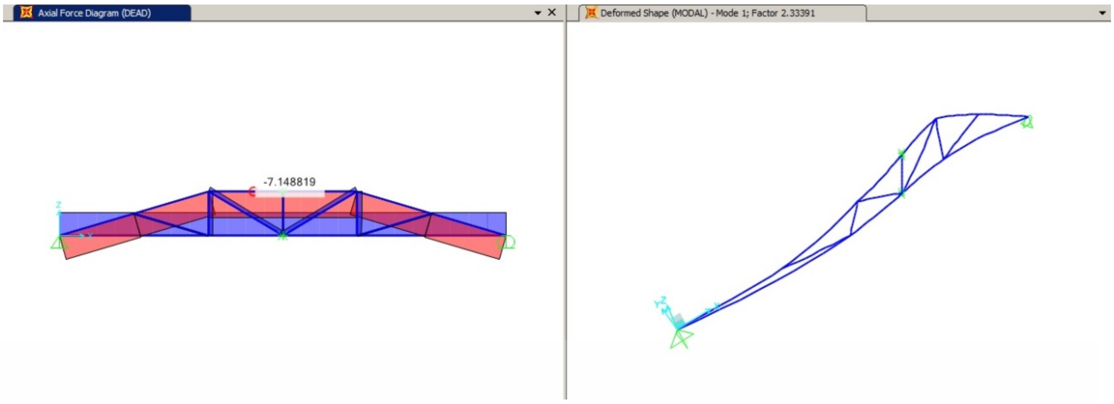



Triangle fink span 12.00 เมตร axial force 12158 N factor 2.49691

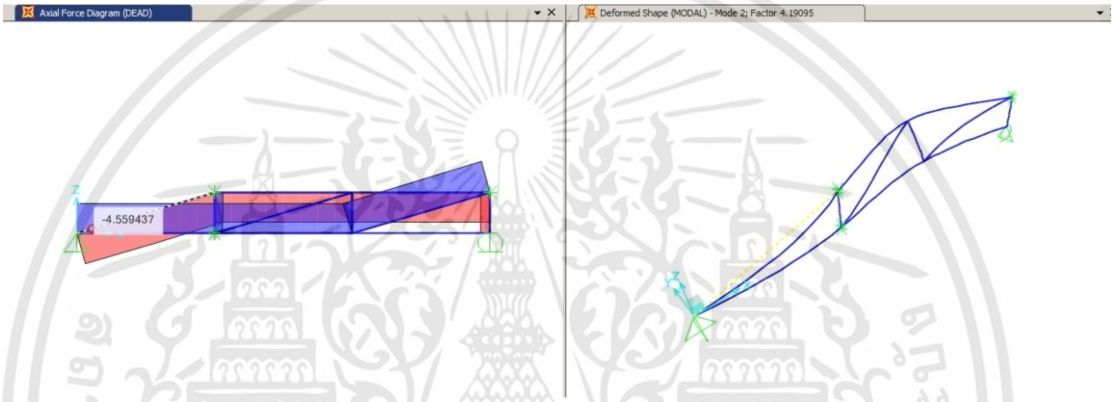



Mono pitch span 12.00 เมตร axial force 18477 N factor 3.05741

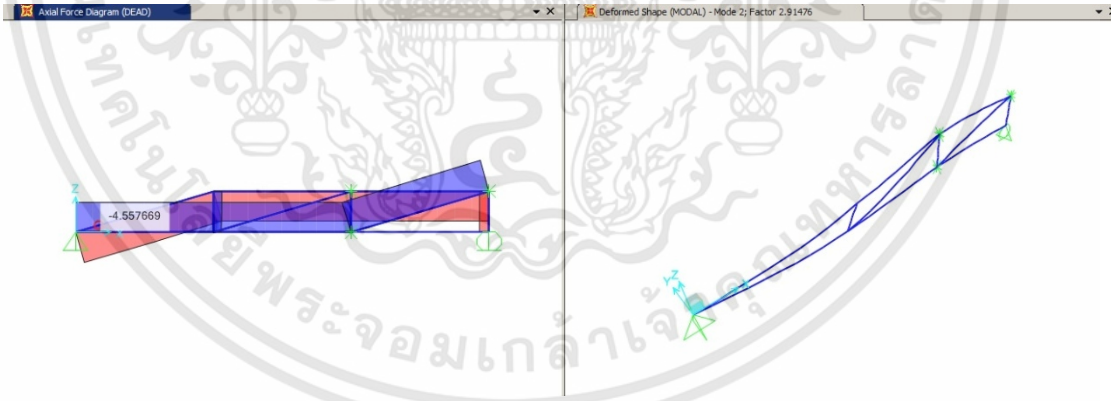
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 12.00 เมตร axial force 7149 N factor 2.33391

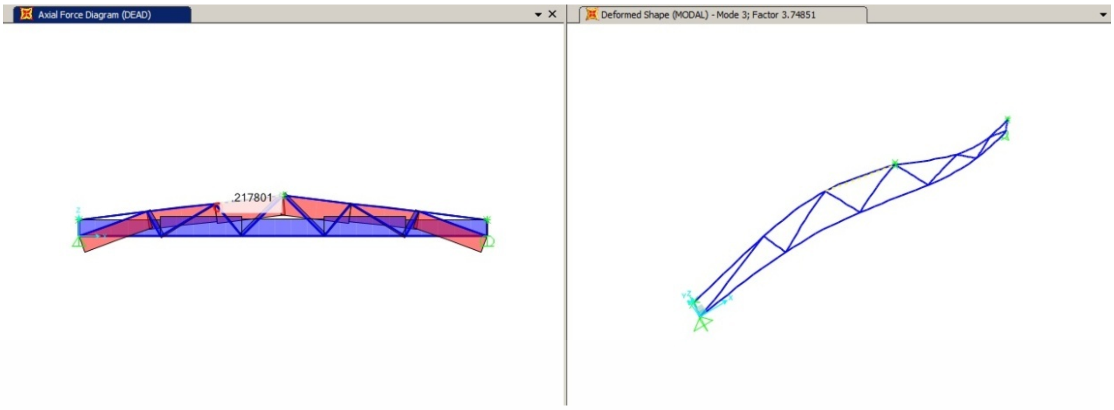



Half hip (front) span 12.00 เมตร axial force 4563 N factor 4.19095

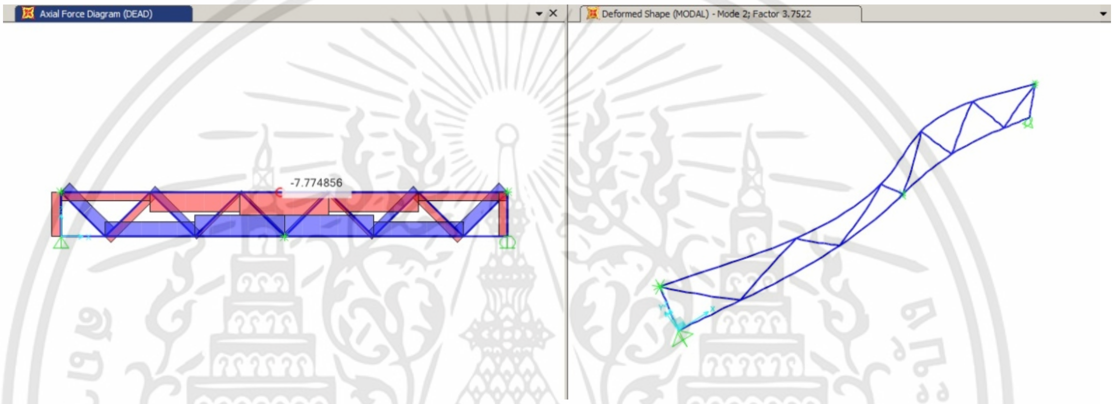



Half hip (rear) span 12.00 เมตร axial force 4563 N factor 2.91476

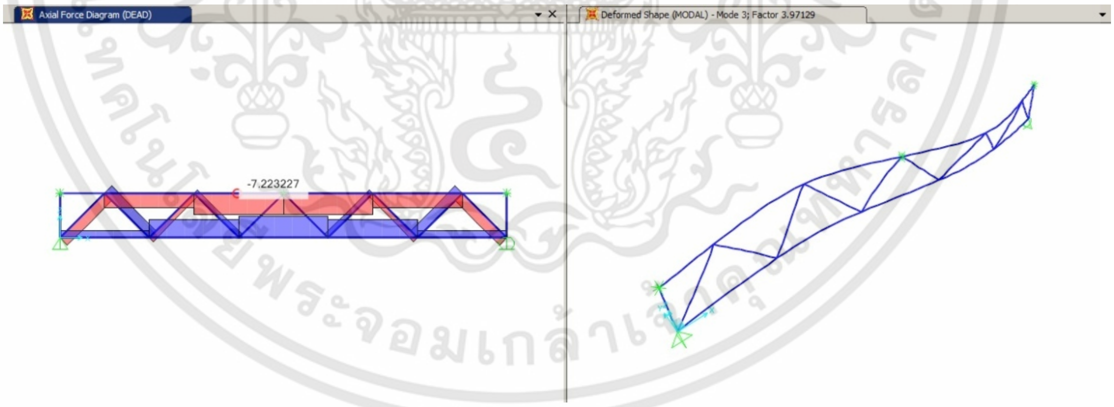
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 12.00 เมตร axial force 8260 N factor 3.74851



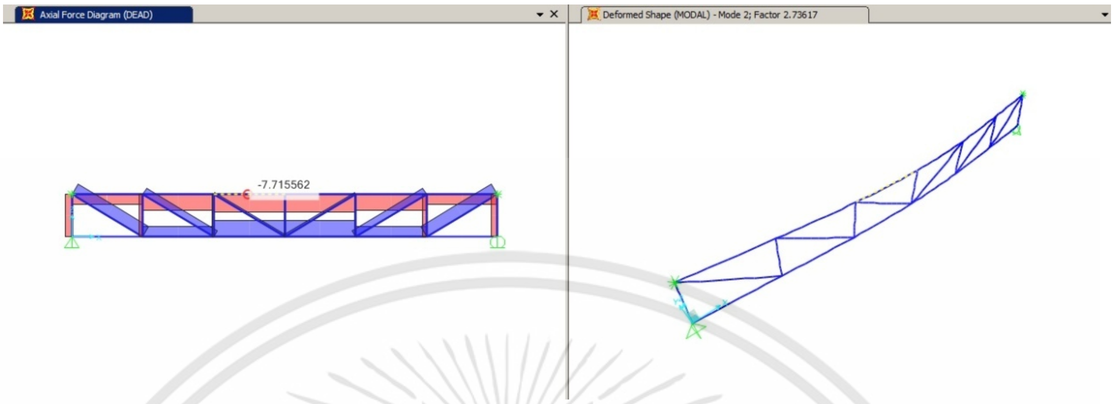

Foot bridge pratt span 12.00 เมตร axial force 7775 N factor 3.7522



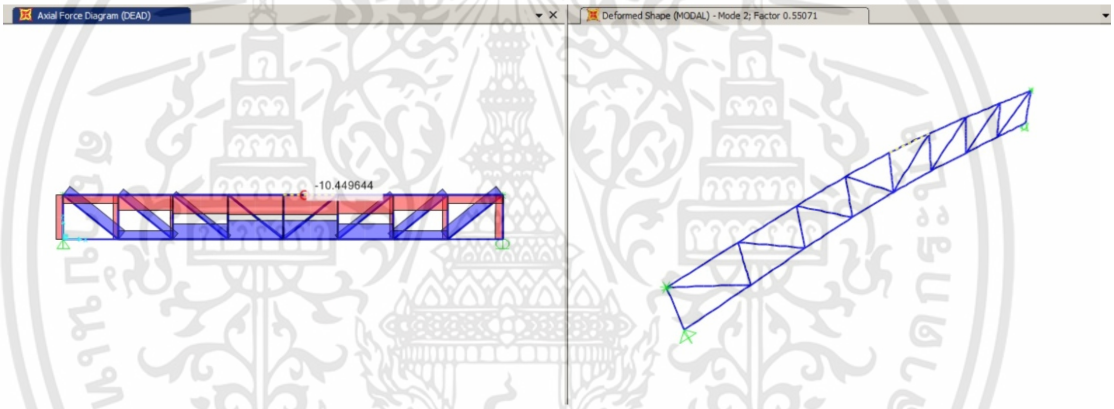

Foot bridge howe span 12.00 เมตร axial force 7223 N factor 3.97129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

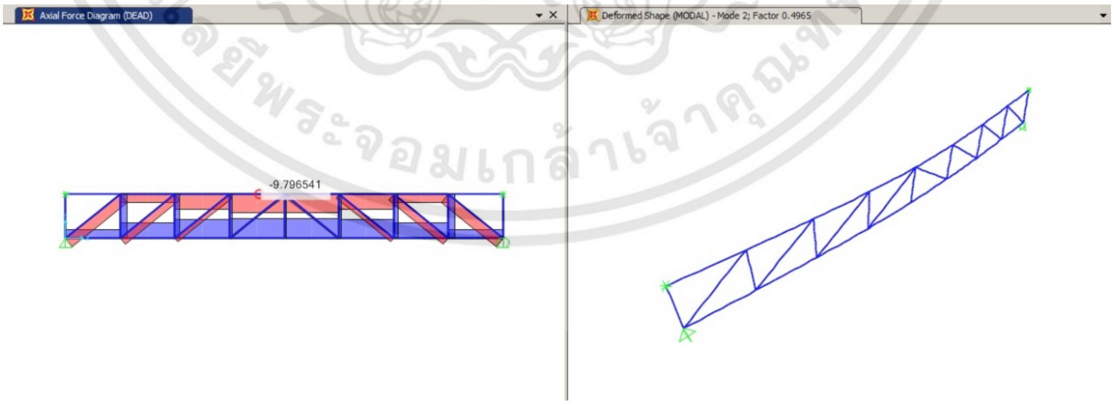
### 3. กรณีศึกษาที่สามไม่มีจุดรอบรับทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ




Pratt truss span 3.60 เมตร axial force 7716 N factor 2.73617

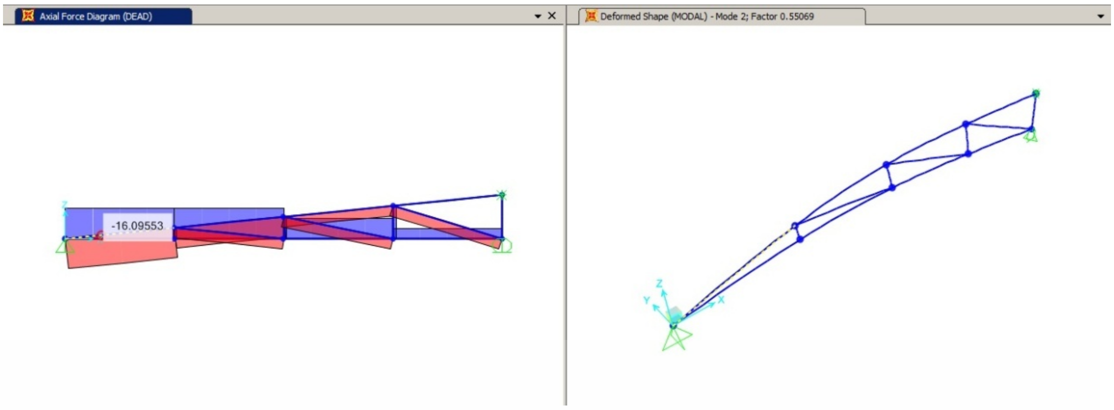



Pratt truss  span 7.00 เมตร axial force 10450 N factor 0.55071

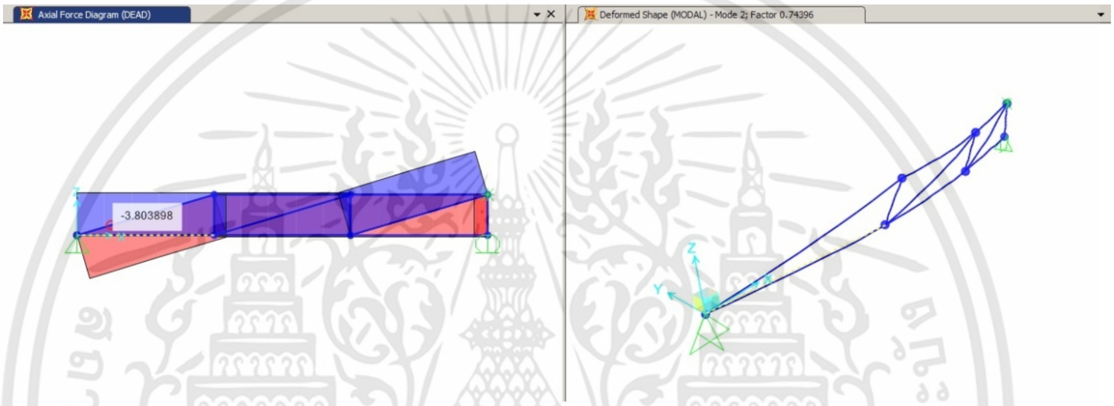



Howe truss  span 7.00 เมตร axial force 10788 N factor 0.4965

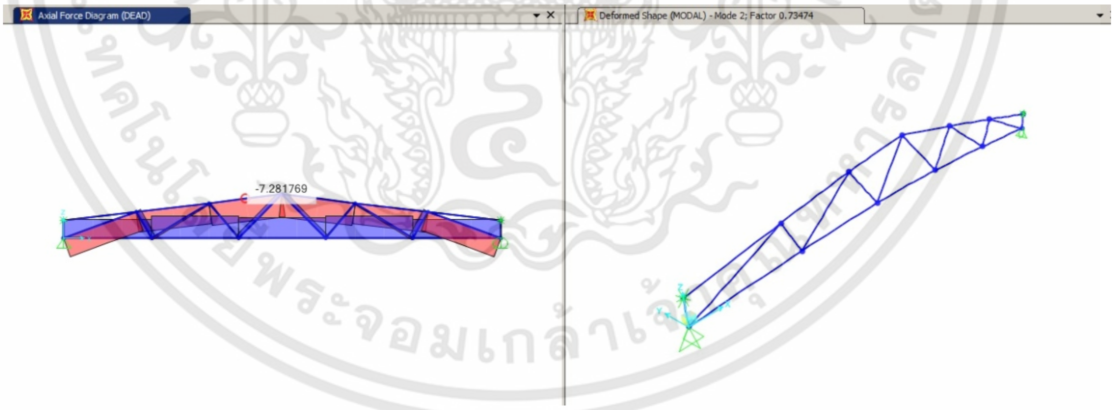
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Mono pitch span 7.00 เมตร axial force 16096 N factor 0.55069

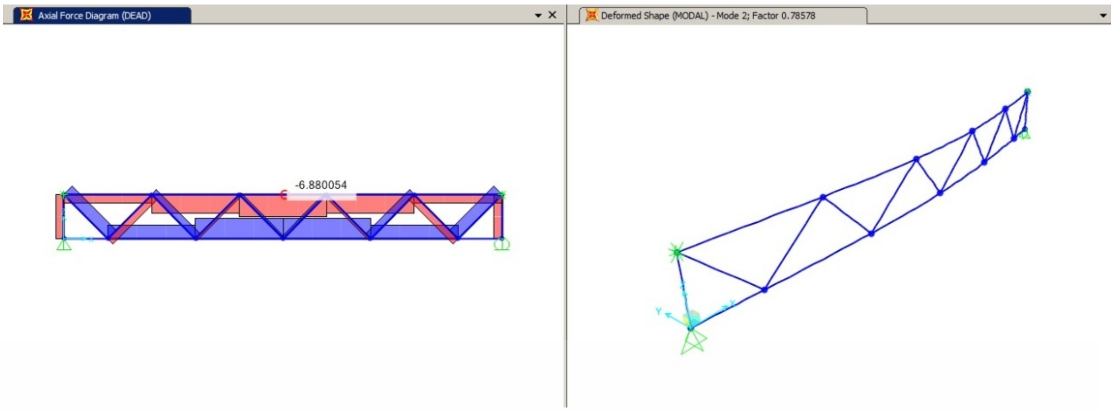



Half hip span 7.00 เมตร axial force 3806 N factor 0.74396

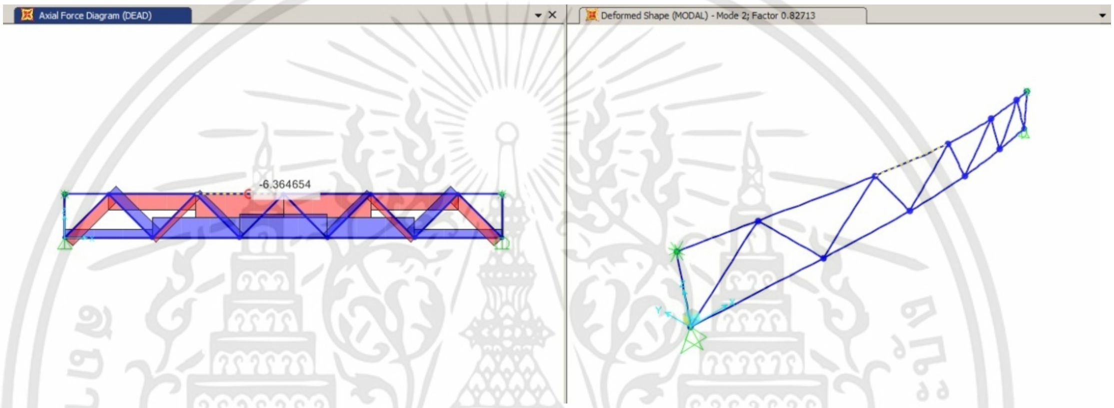



Double stub end span 7.00 เมตร axial force 7283 N factor 0.73474

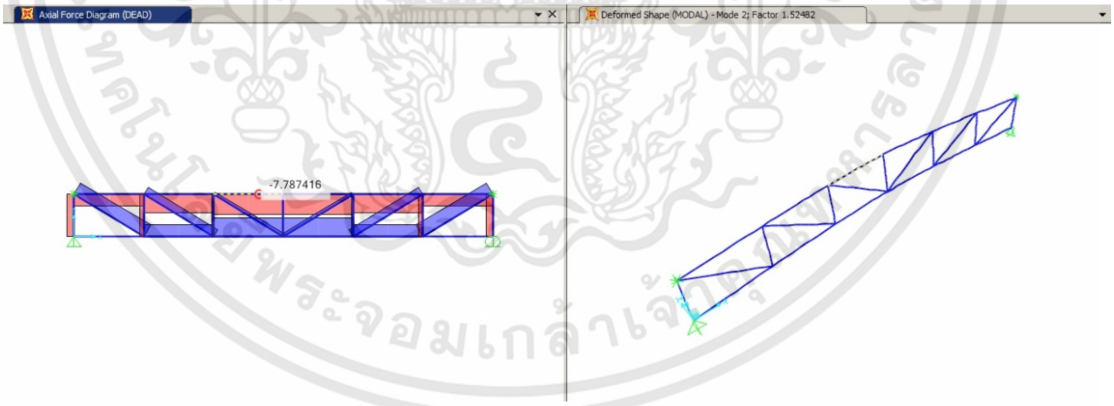
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Foot bridge pratt span 7.00 เมตร axial force 6880 N factor 0.78578

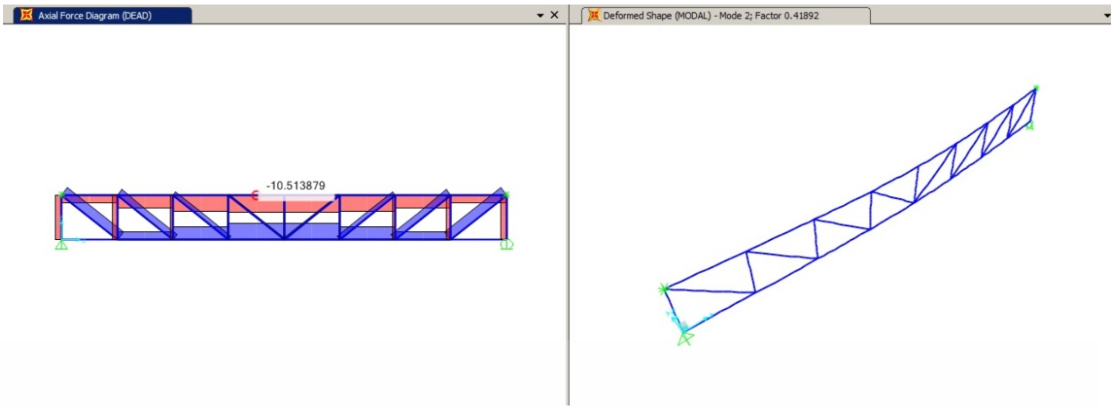



Foot bridge howe span 7.00 เมตร axial force 6365 N factor 0.82713

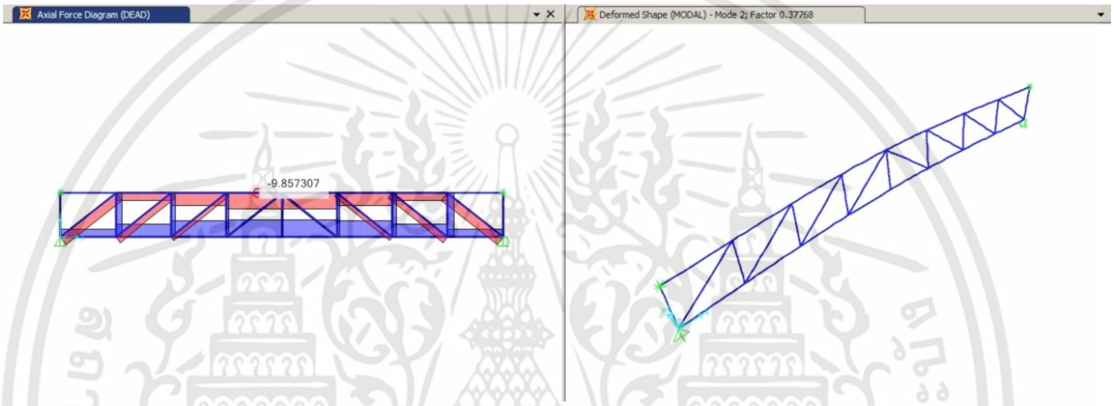



Pratt truss span 4.80 เมตร axial force 7787 N factor 1.52482

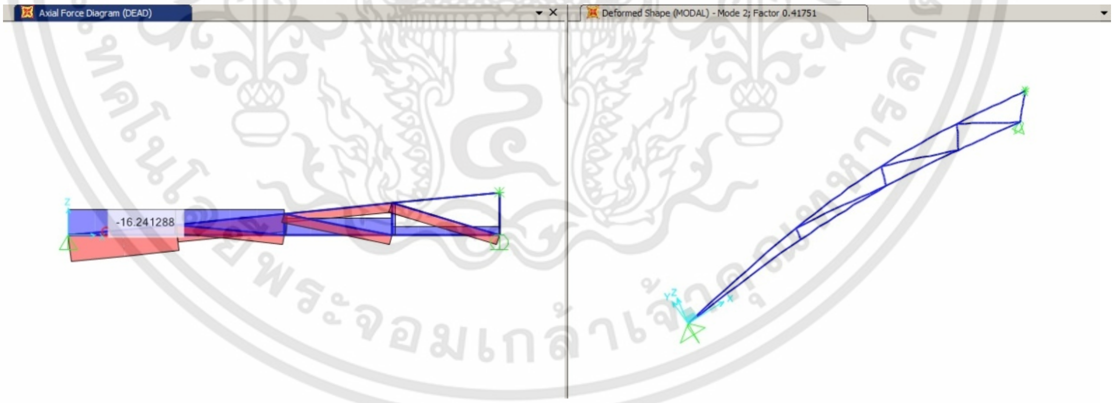
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss  span 8.00 เมตร axial force 10514 N factor 0.41892

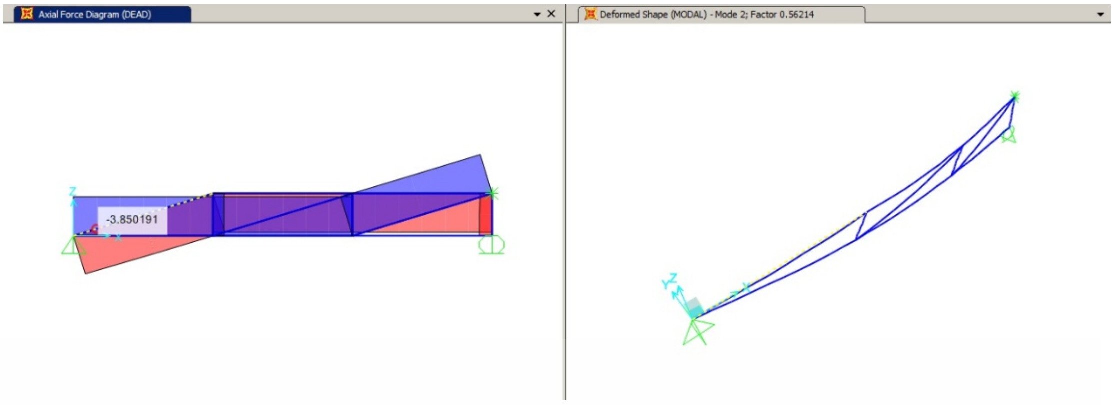



Howe truss  span 8.00 เมตร axial force 9857 N factor 0.37768

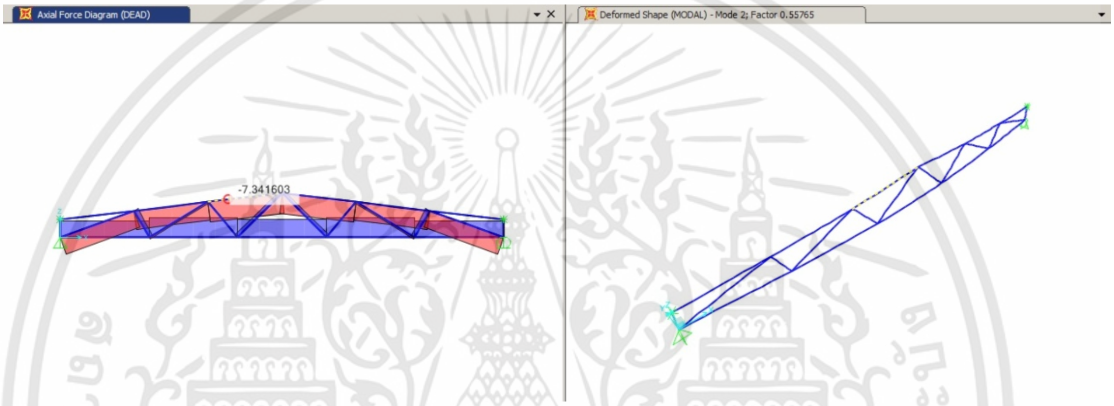



Mono pitch span 8.00 เมตร axial force 16242 N factor 0.41751

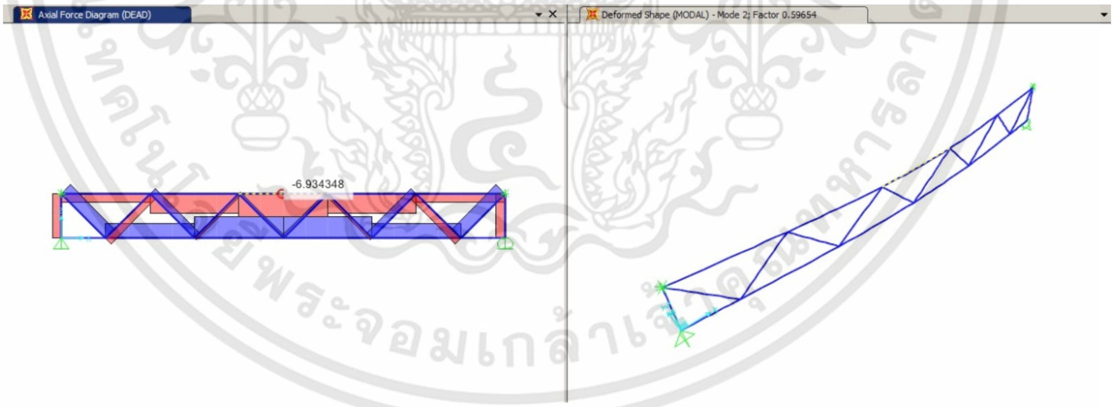
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Half hip span 8.00 เมตร axial force 3852 N factor 0.56214

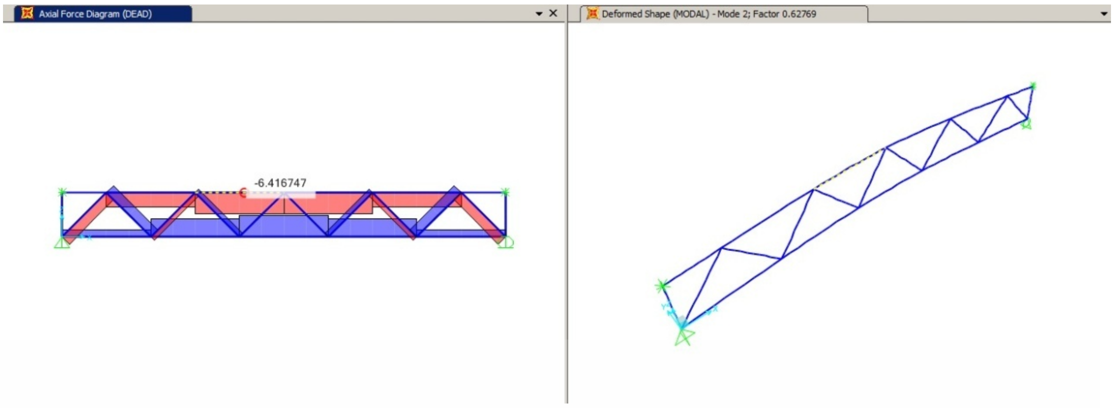



Double stub end span 8.00 เมตร axial force 7342 N factor 0.55765

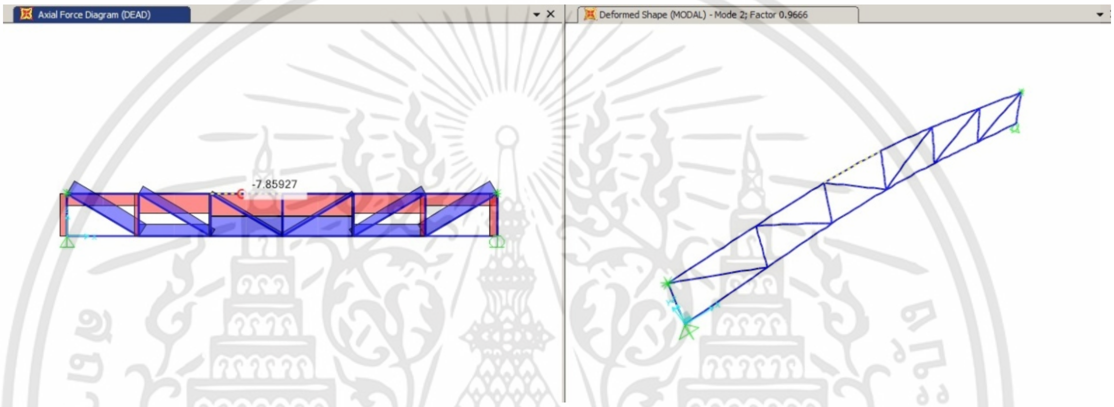



Foot bridge pratt span 8.00 เมตร axial force 6934 N factor 0.59654

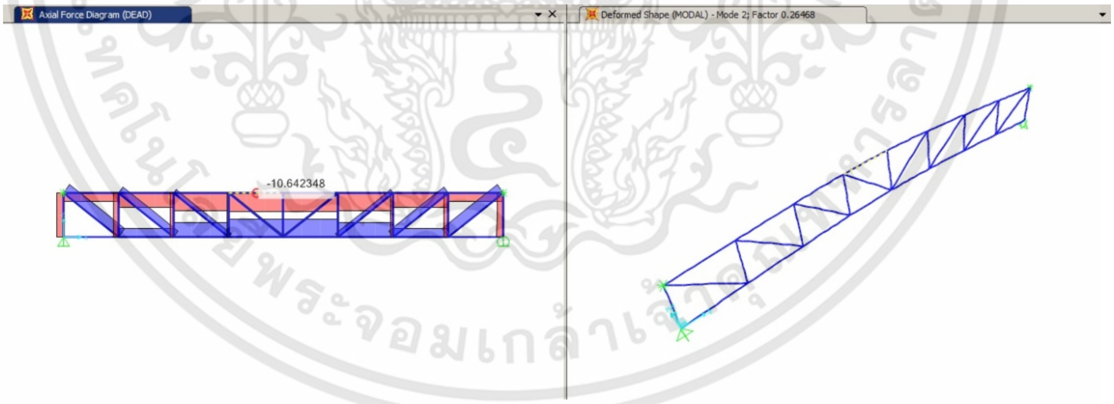
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Foot bridge howe span 8.00 เมตร axial force 6417 N factor 0.62769

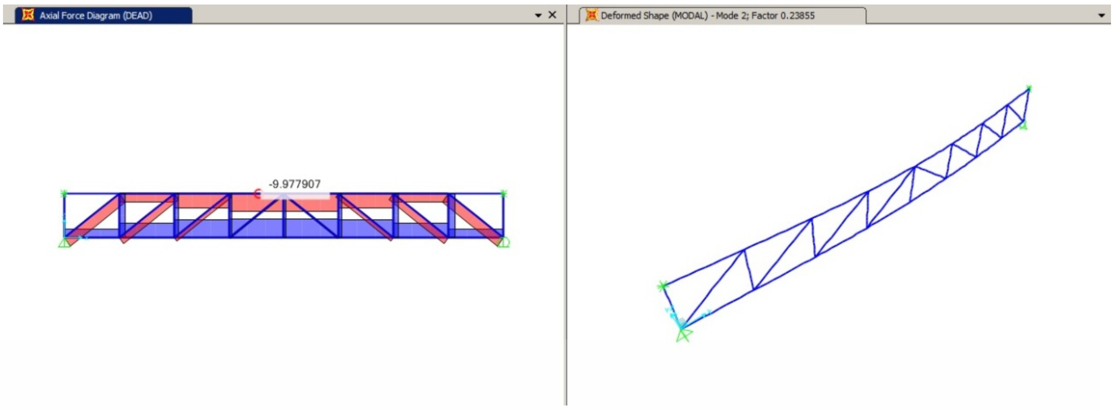



Pratt truss span 6.00 เมตร axial force 7859 N factor 0.9666

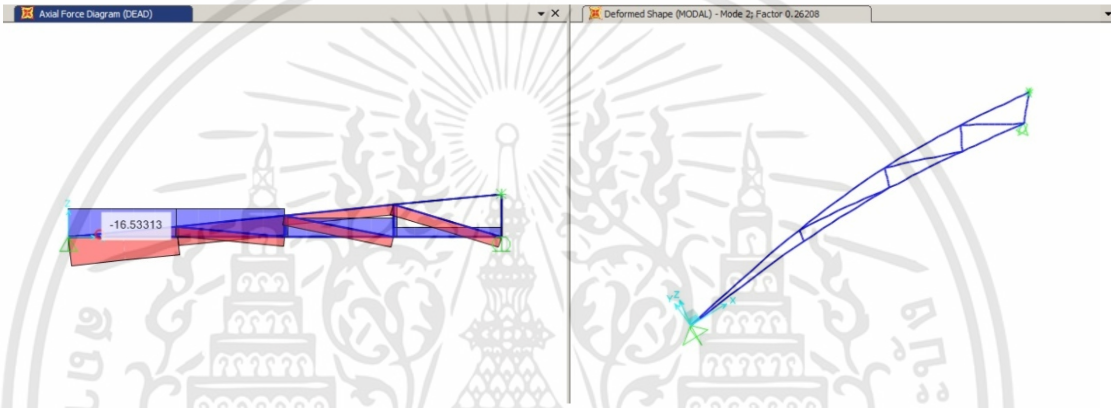



Pratt truss  span 10.00 เมตร axial force 10642 N factor 0.26468

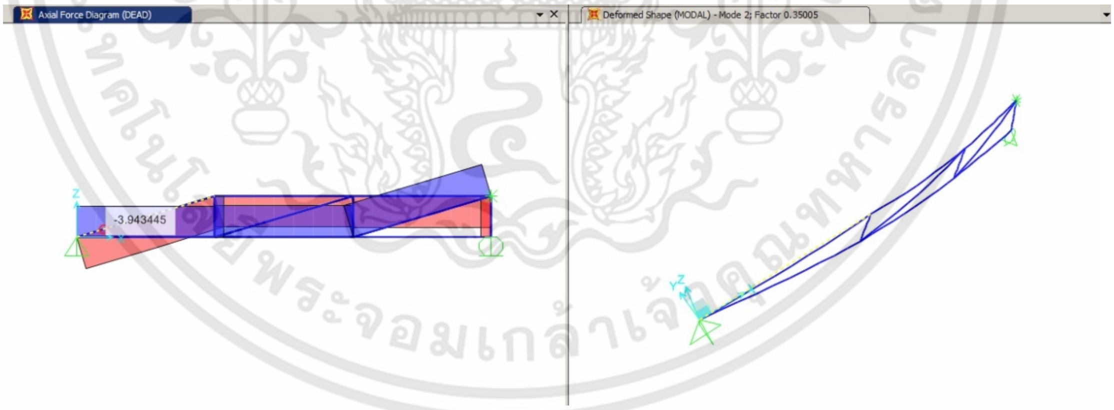
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Howe truss  span 10.00 เมตร axial force 9978 N factor 0.23855

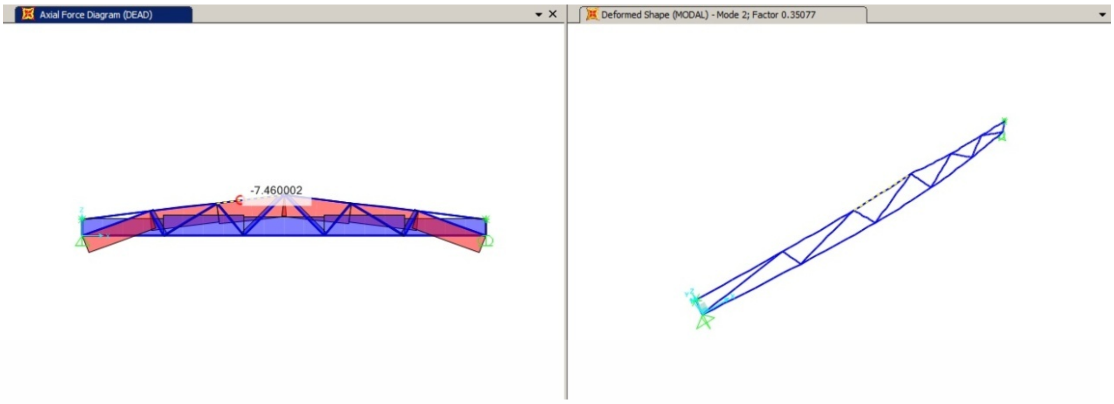



Mono pitch span 10.00 เมตร axial force 16534 N factor 0.26208

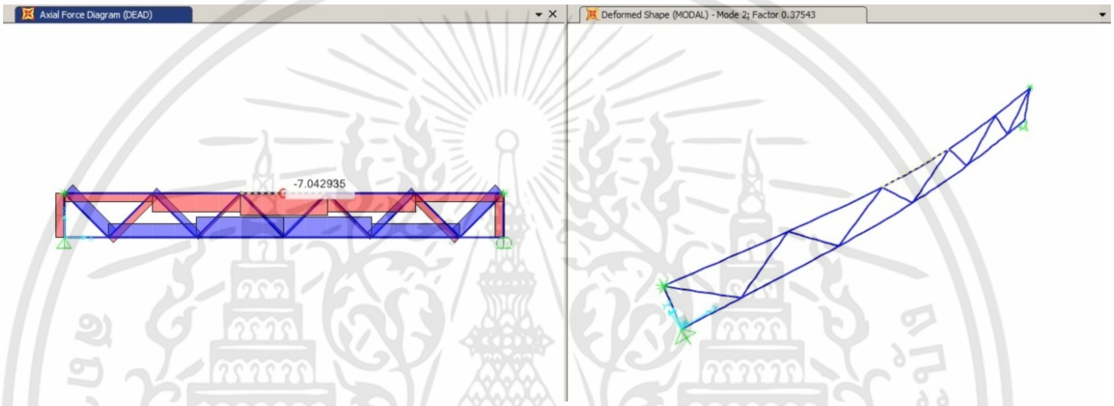



half hip span 10.00 เมตร axial force 3946 N factor 0.35005

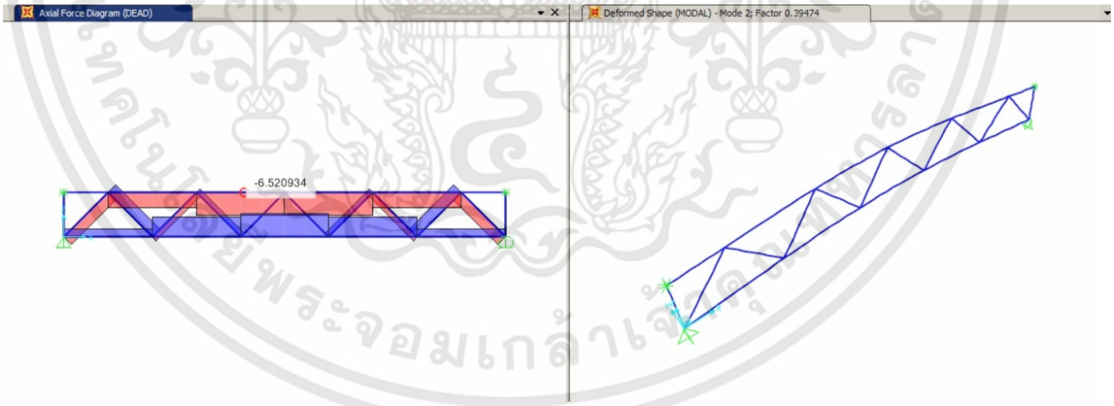
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 10.00 เมตร axial force 7461 N factor 0.35077

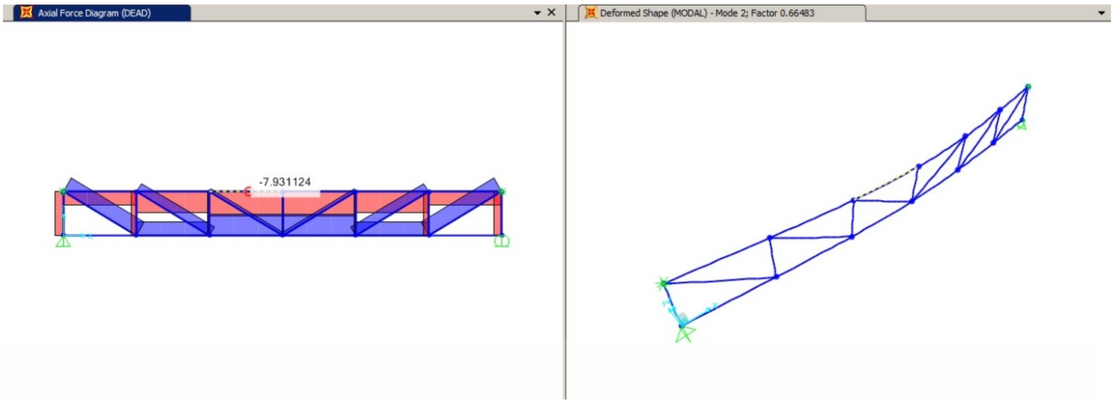



Foot bridge pratt span 10.00 เมตร axial force 7043 N factor 0.37543

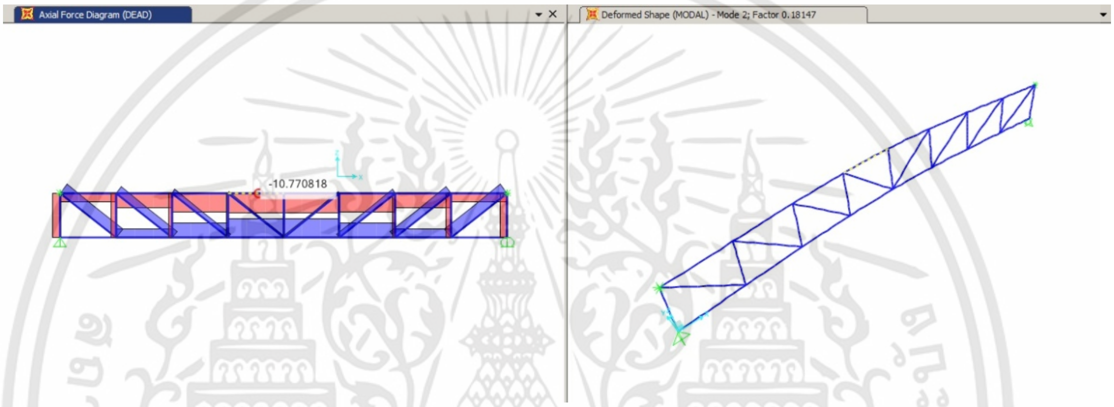



Foot bridge howe span 10.00 เมตร axial force  6521 N factor 0.39474

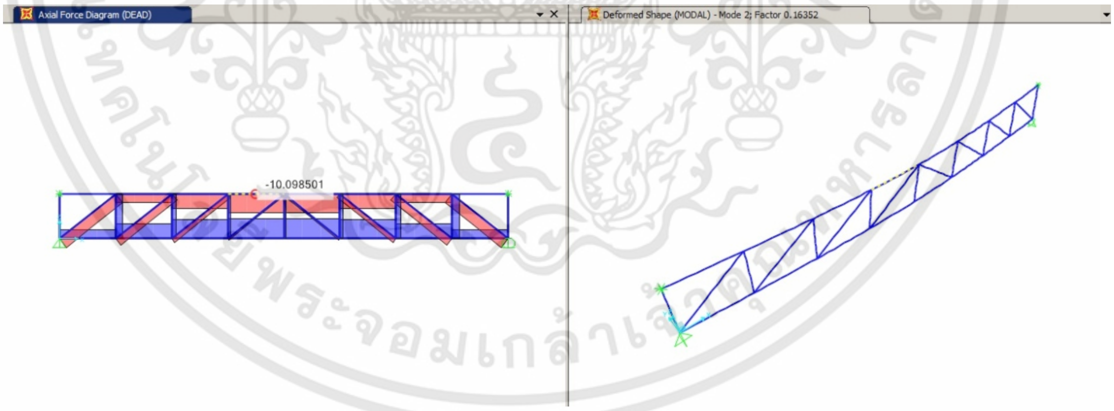
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 7.20 เมตร axial force 7931 N factor 0.66483

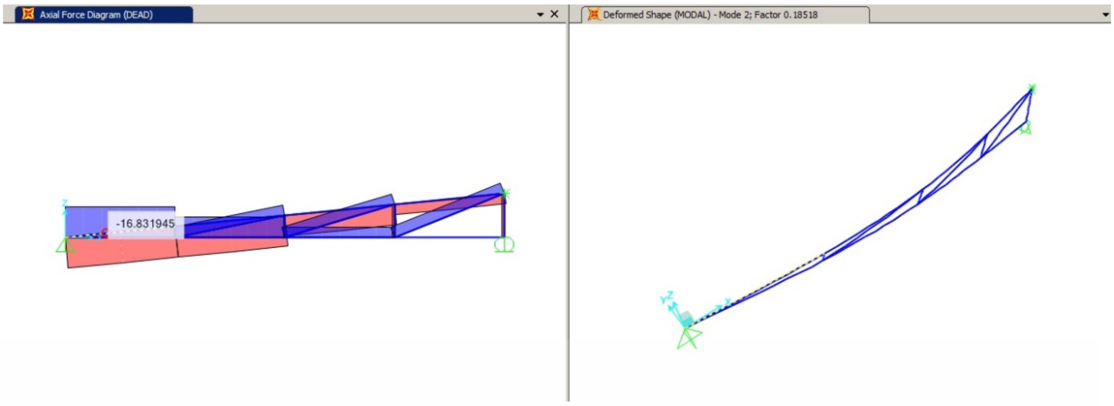



Pratt truss  span 12.00 เมตร axial force 10771 N factor 0.18147

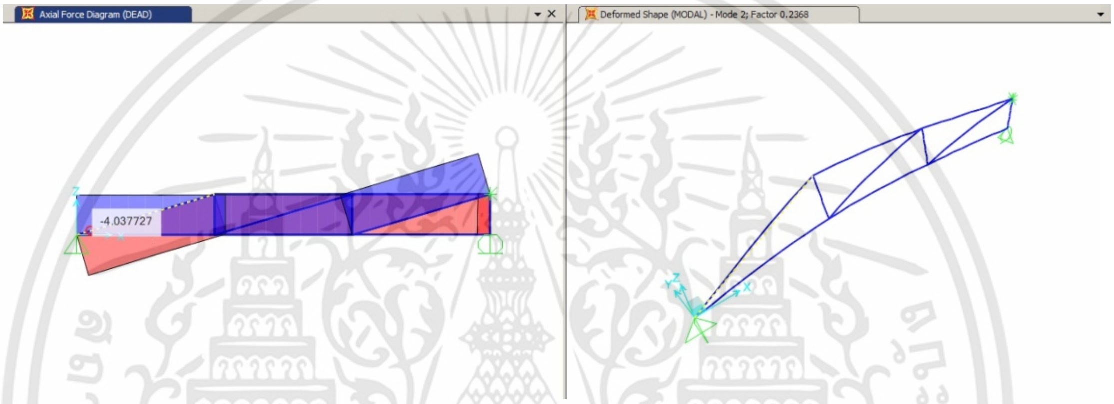



Howe truss  span 12.00 เมตร axial force 10099 N factor 0.16352

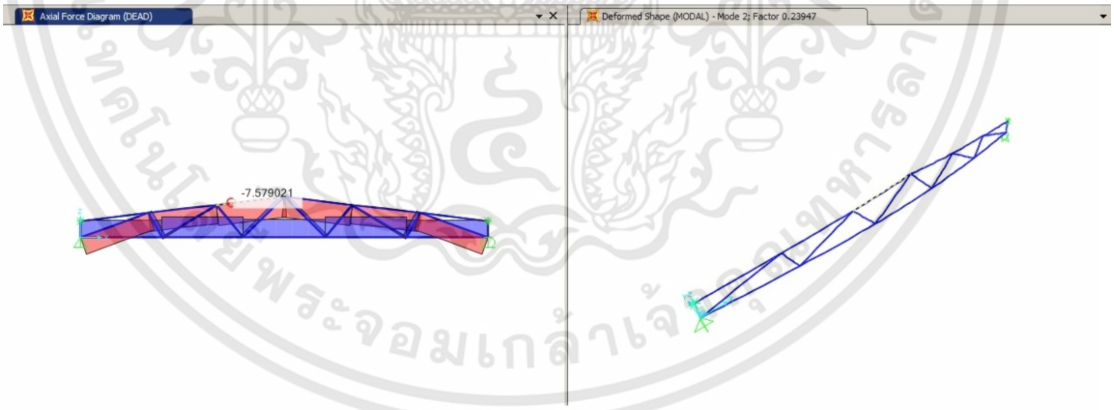
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Mono pitch span 12.00 เมตร axial force 16834 N factor 0.18518

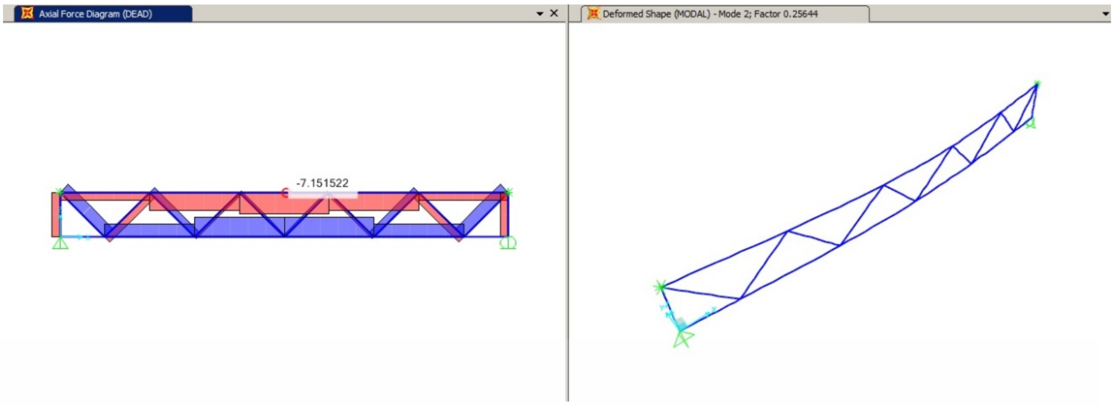



Half hip span 12.00 เมตร axial force 4039 N factor 0.2368

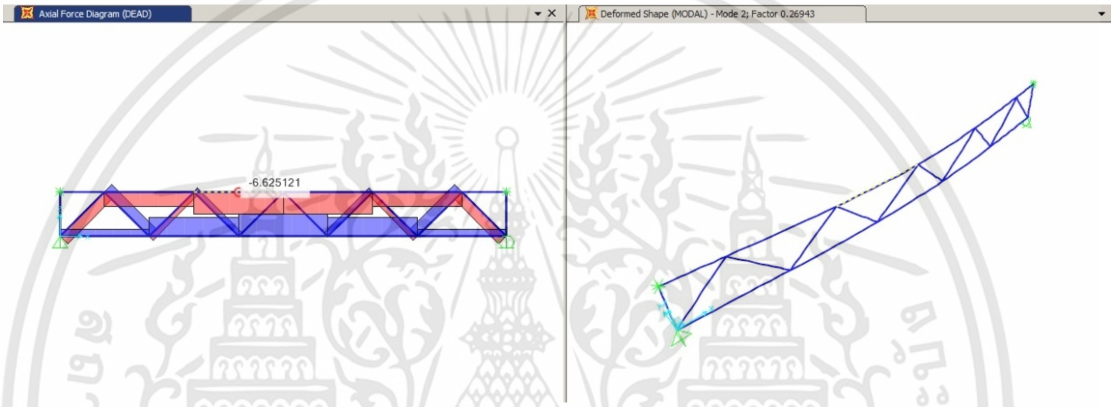



Double stub end span 12.00 เมตร axial force 7580 N factor 0.23947

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



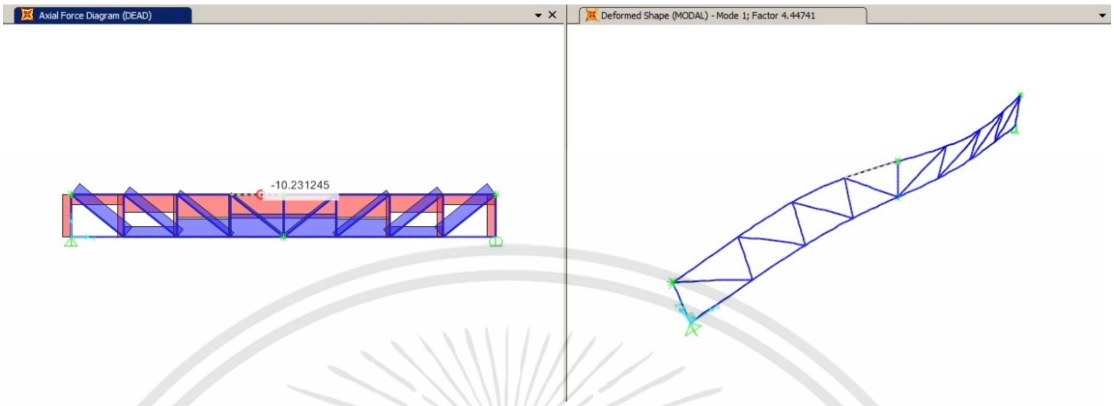

Foot bridge pratt span 12.00 เมตร axial force 7152 N factor 0.25644



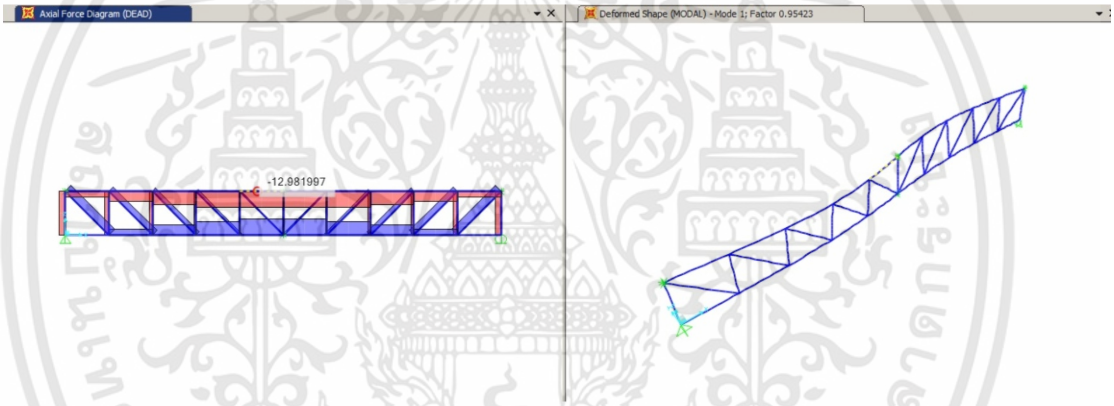

Foot bridge howe span 12.00 เมตร axial force 6625 N factor 0.26943

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

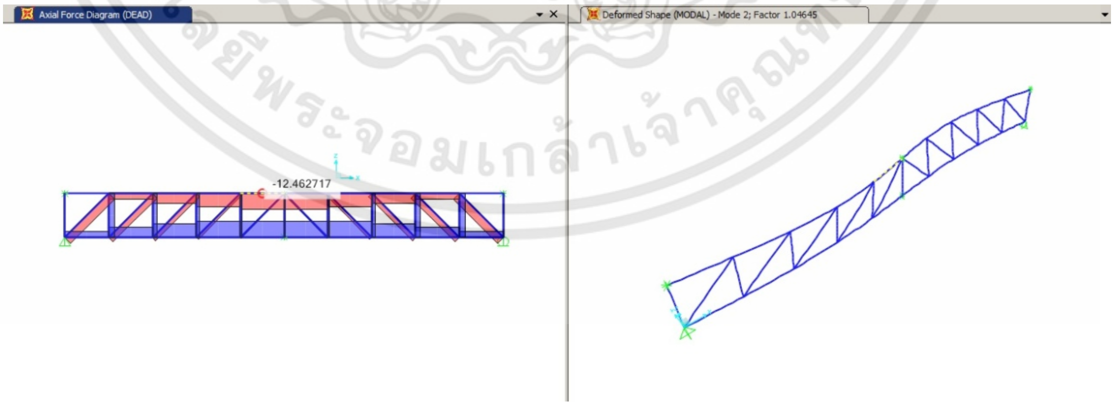
**4. กรณีศึกษาที่สี่มีค้ำยันทางข้างบริเวณกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัด 25x25x2 มิลลิเมตร และ 20x20x2 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนหลัก ชิ้นส่วนย่อยตามลำดับ แต่เพิ่มชิ้นส่วนถัก ชิ้นส่วนย่อยให้ถี่ขึ้นแต่ความยาวโดยรวม เท่าเดิม**




Pratt truss span 3.60 เมตร axial force 10231 N factor 4.44741

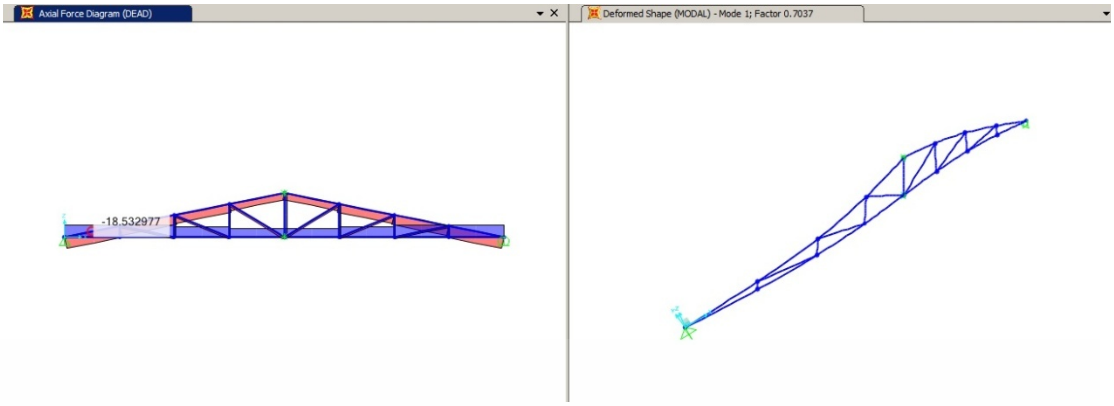



Pratt truss  span 7.00 เมตร axial force 12982 N factor 0.95423

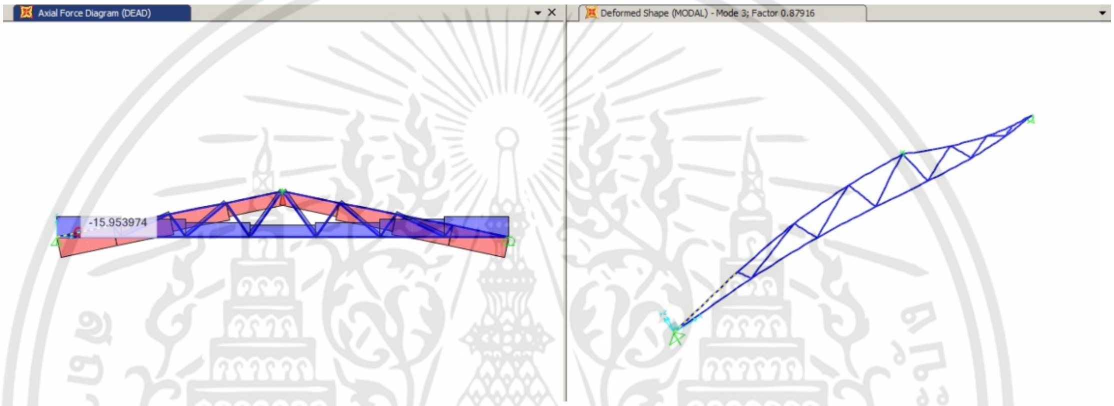



Howe truss  span 7.00 เมตร axial force 12463 N factor 1.04645

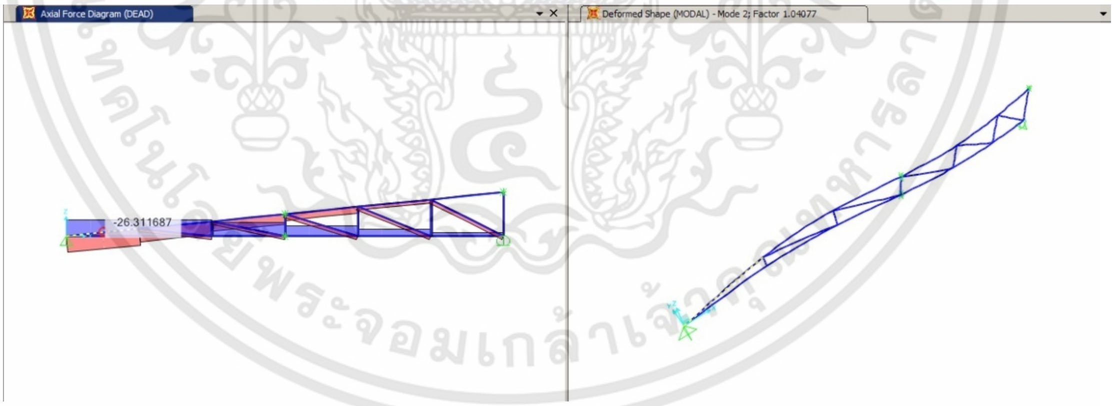
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 7.00 เมตร axial force 18534 N factor 0.7037

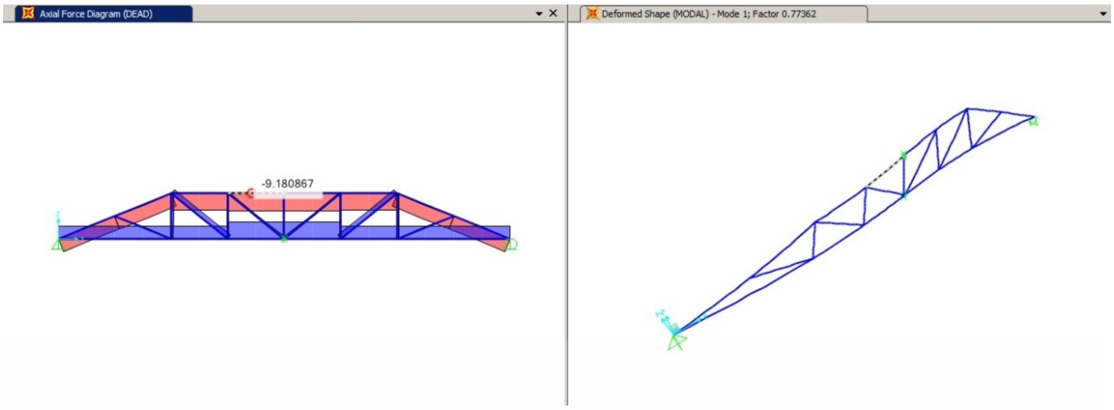



Triangle fink span 7.00 เมตร axial force 15955 N factor 0.87916

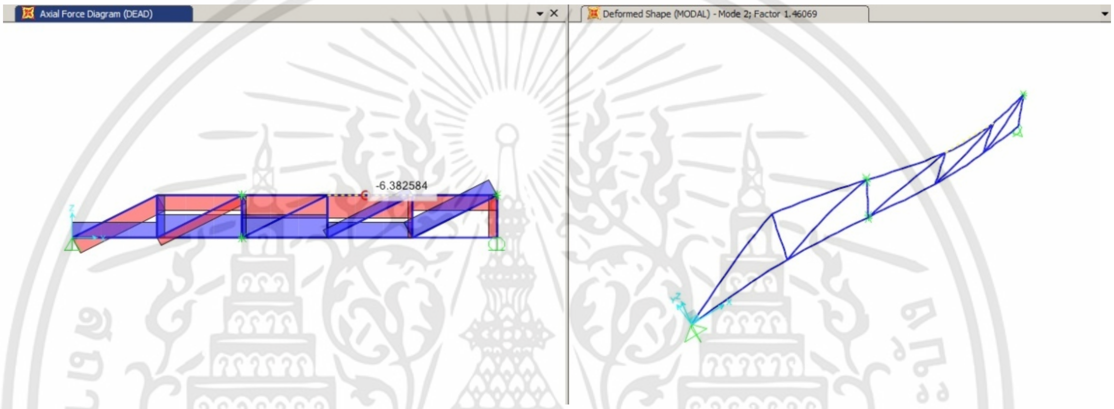



Mono pitch span 7.00 เมตร axial force 26313 N factor 1.04077

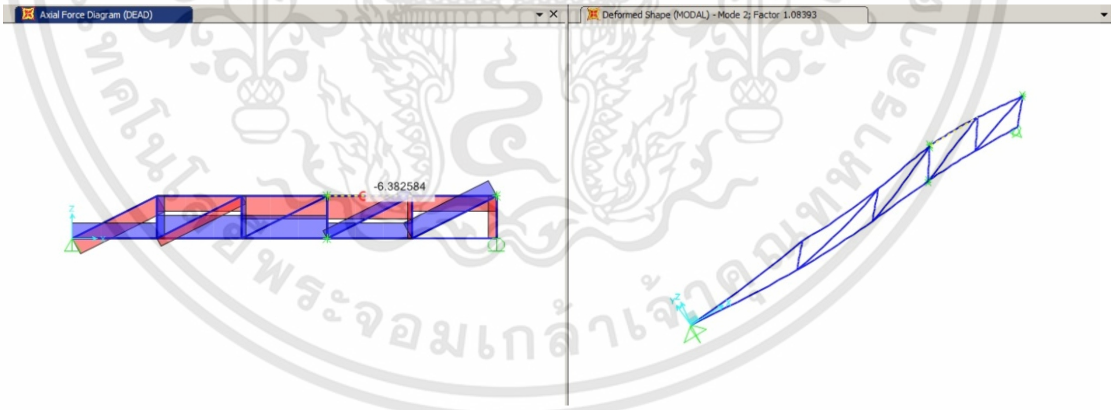
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 7.00 เมตร axial force 9181 N factor 0.77362

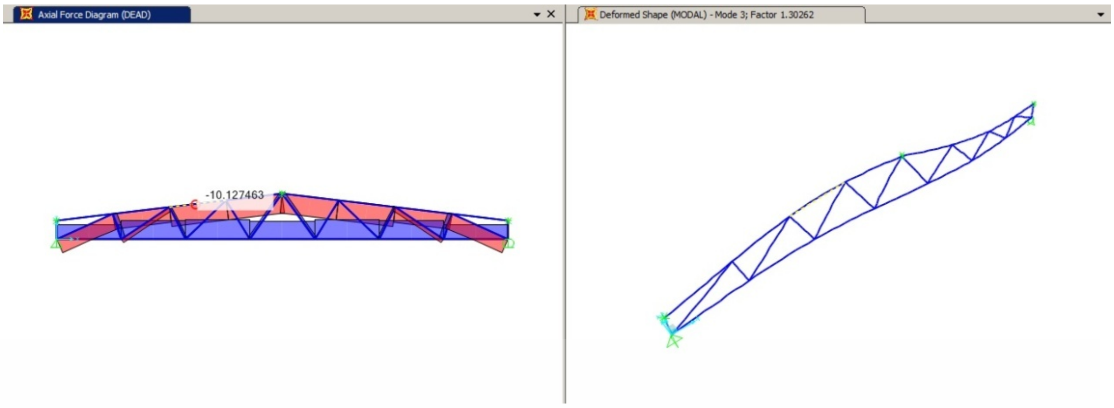



Half hip (front) span 7.00 เมตร axial force 6383 N factor 1.46069

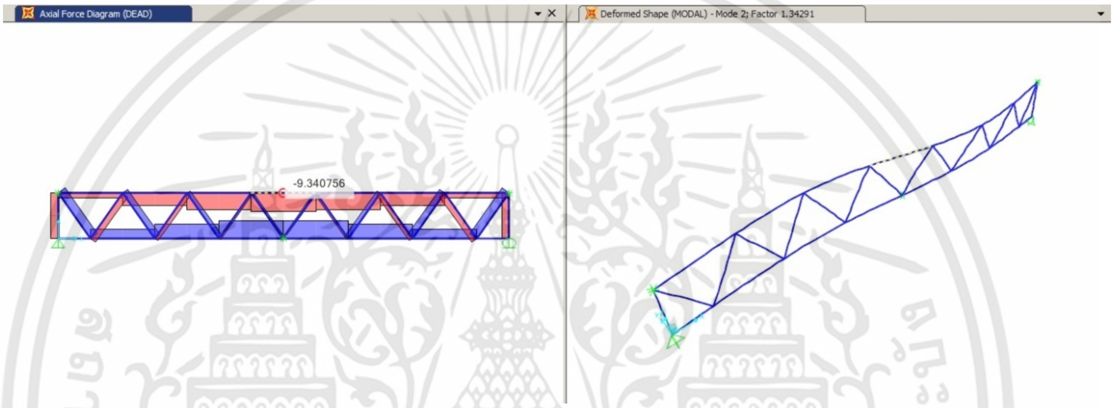



Half hip (rear) span 7.00 เมตร axial force 6383 N factor 1.08393

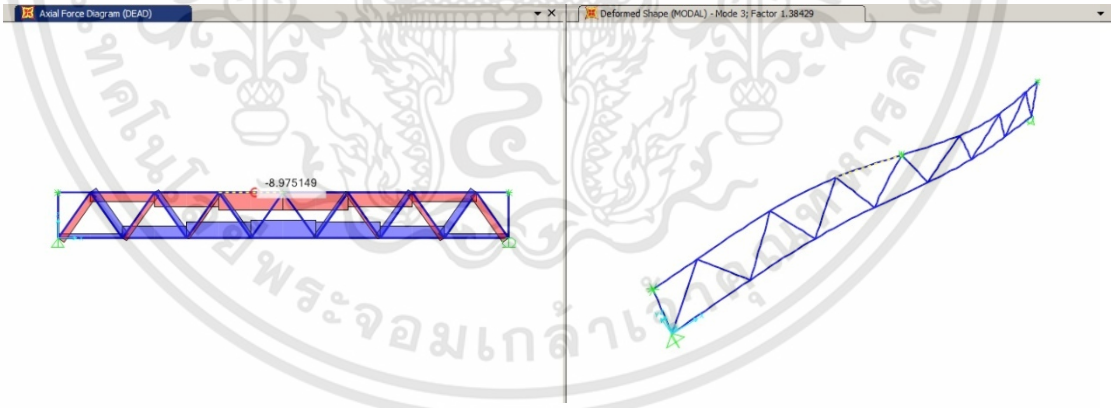
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 7.00 เมตร axial force 10128 N factor 1.30262

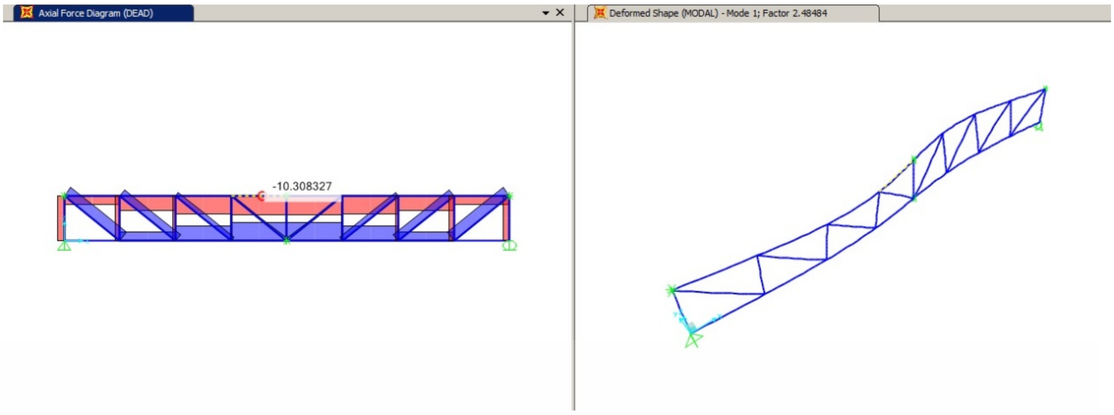



Foot bridge pratt span 7.00 เมตร axial force 9341 N factor 1.34291

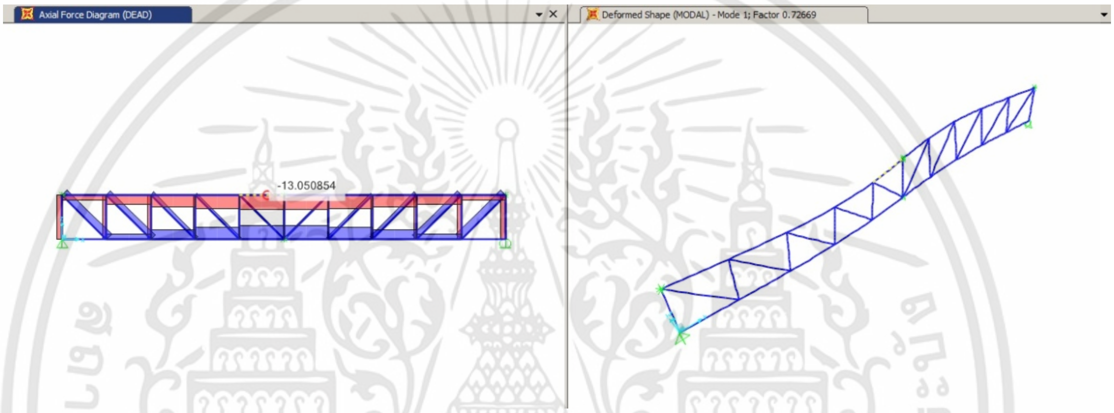



Foot bridge howe span 7.00 เมตร axial force 8975 N factor 1.38429

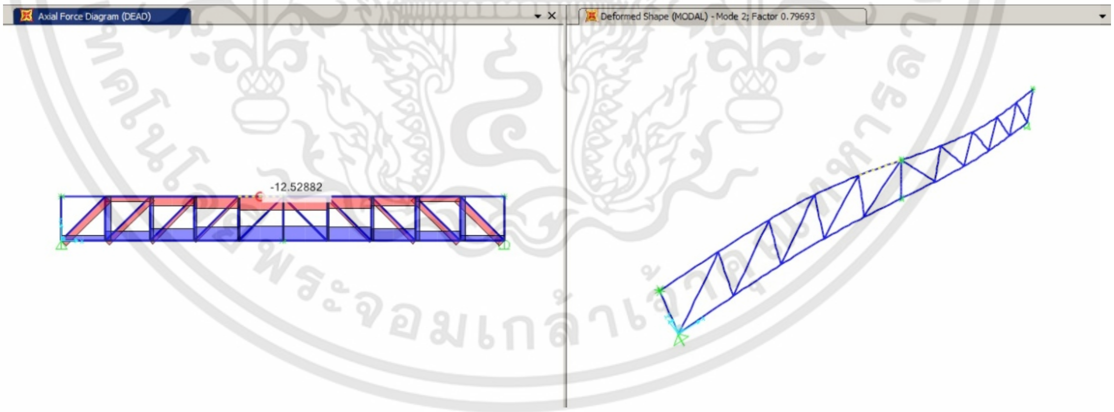
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 4.80 เมตร axial force 10308 N factor 2.48484

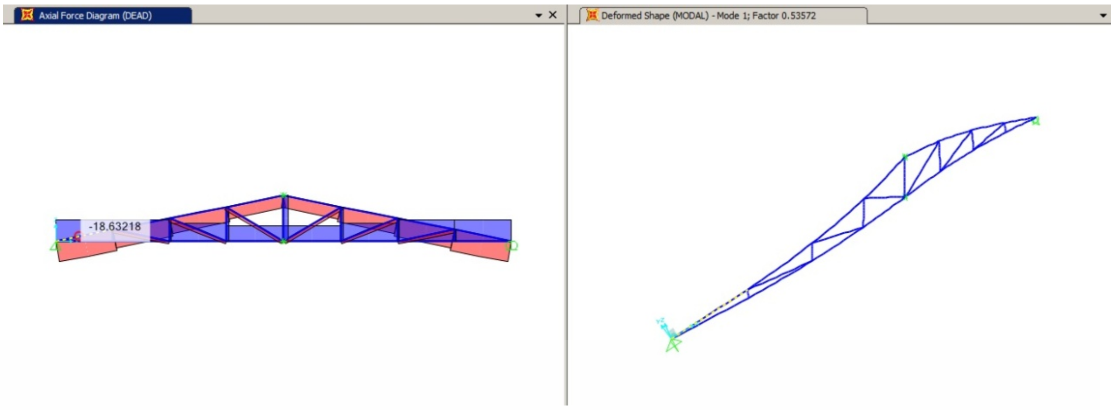



Pratt truss  span 8.00 เมตร axial force 13051 N factor 0.72669

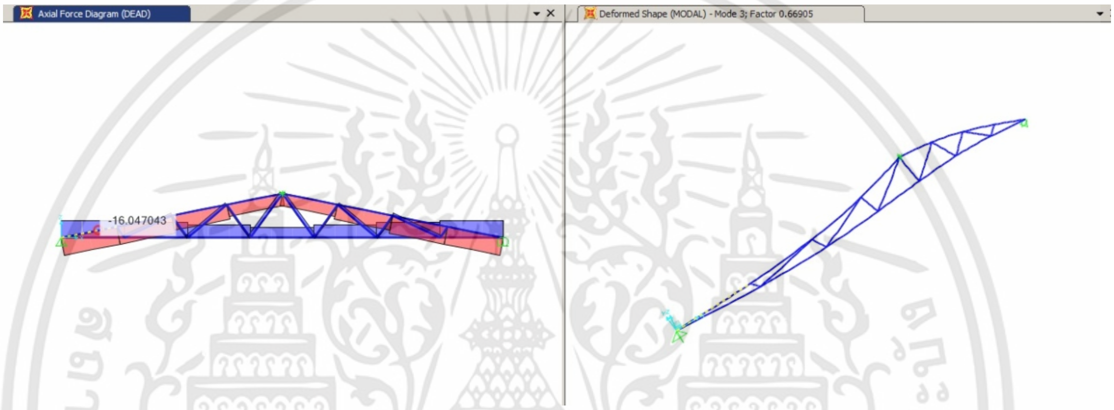



Howe truss  span 8.00 เมตร axial force 12529 N factor 0.79693

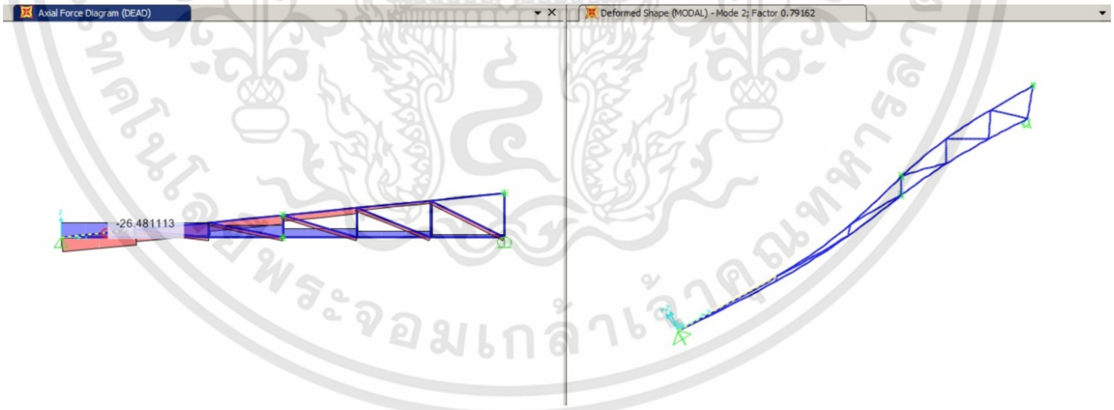
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 8.00 เมตร axial force 18633 N factor 0.53572

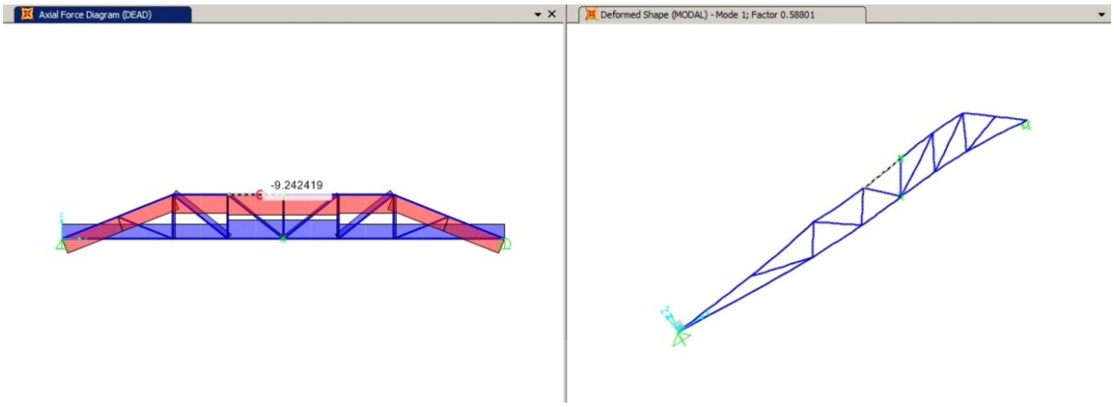



Triangle fink span 8.00 เมตร axial force 16049 N factor 0.66905

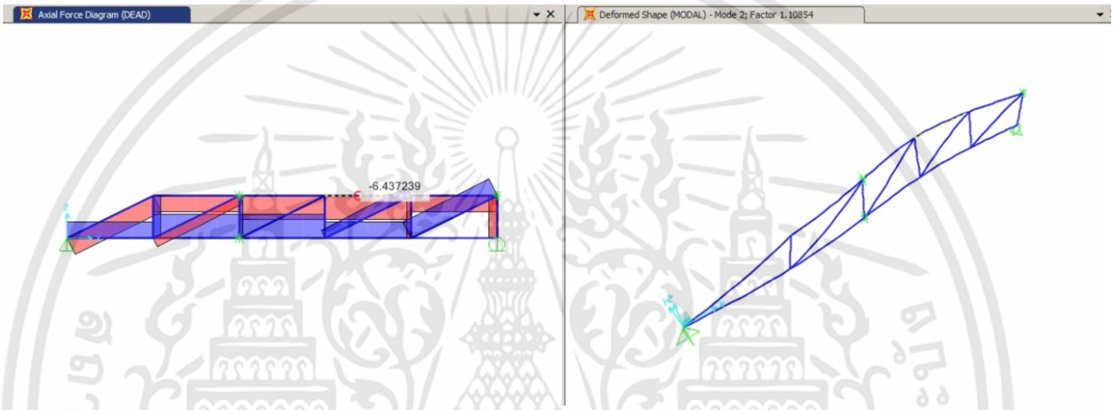



Mono pitch span 8.00 เมตร axial force 26482 N factor 0.79162

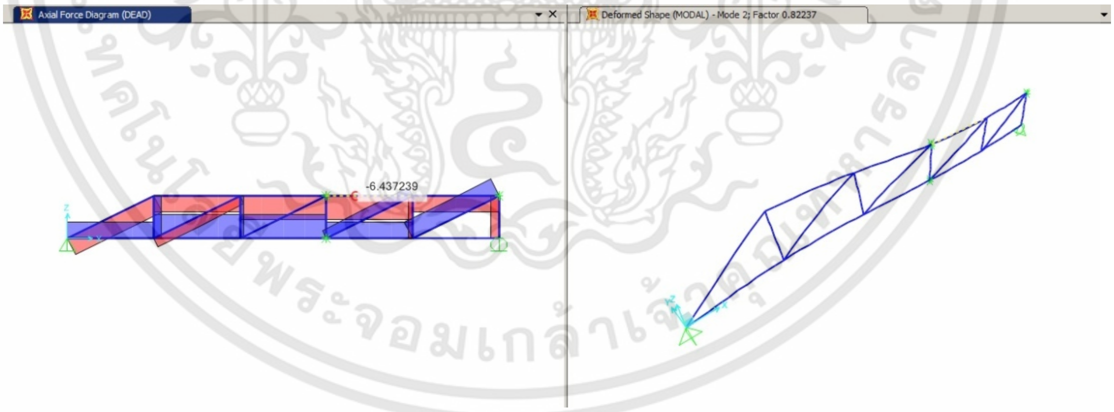
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 8.00 เมตร axial force 9242 N factor 0.58801

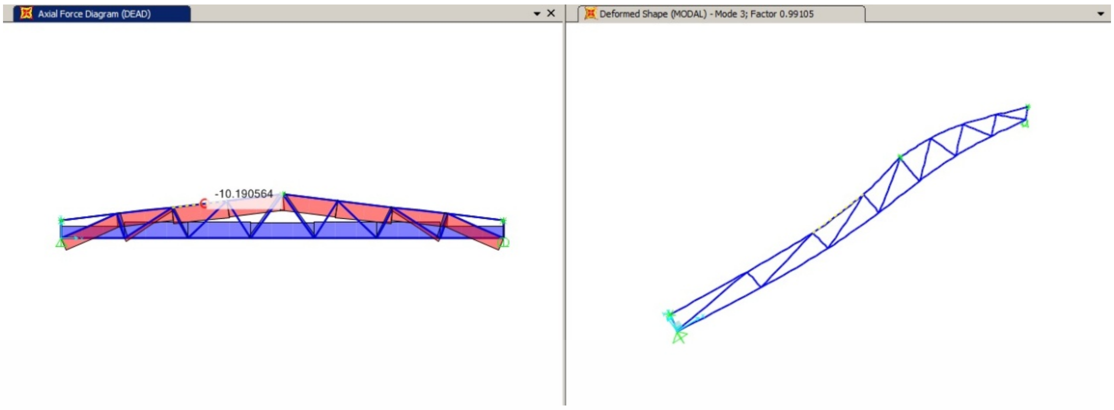



Half hip (front) span 8.00 เมตร axial force 6437 N factor 1.10854

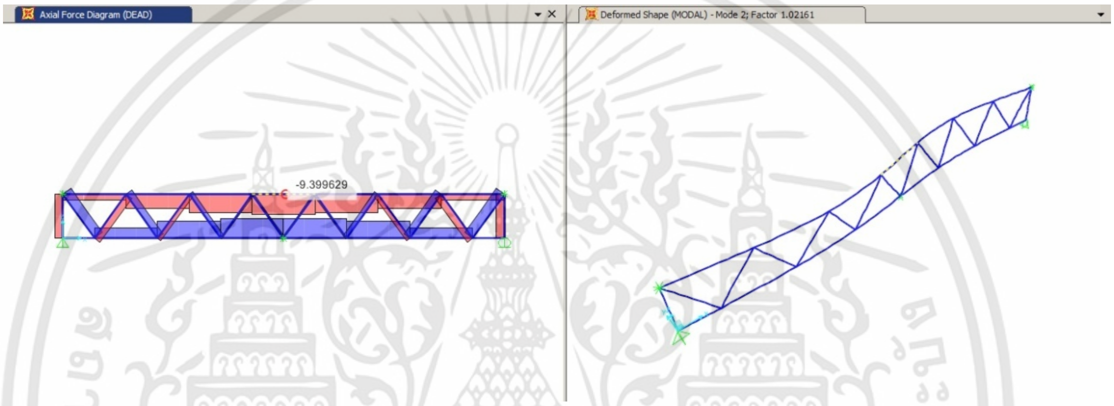



Half hip (rear) span 8.00 เมตร axial force 6437 N factor 0.82237

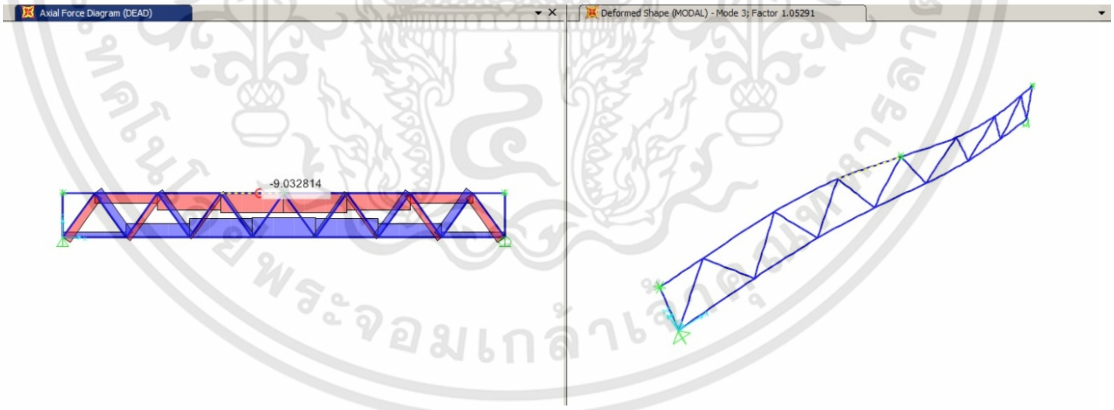
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 8.00 เมตร axial force 10192 N factor 0.99105

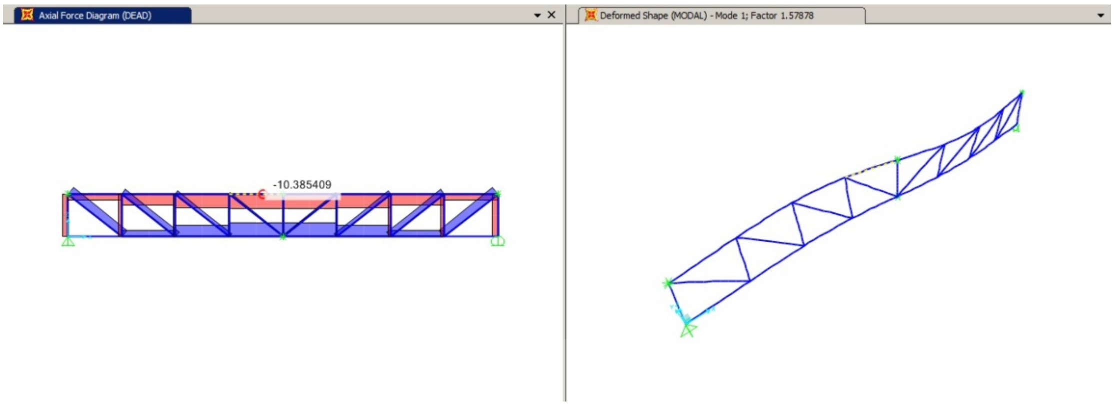



Foot bridge pratt span 8.00 เมตร axial force 9400 N factor 1.02161

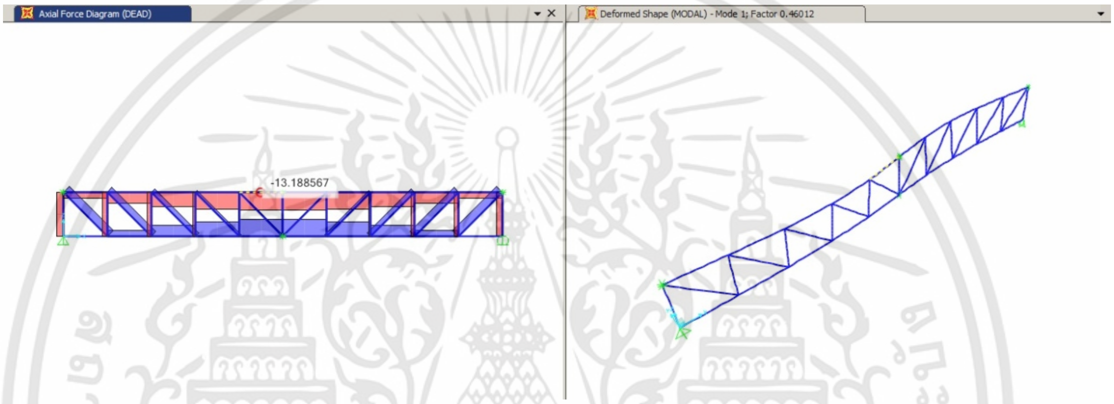



Foot bridge howe span 8.00 เมตร axial force 9033 N factor 1.05291

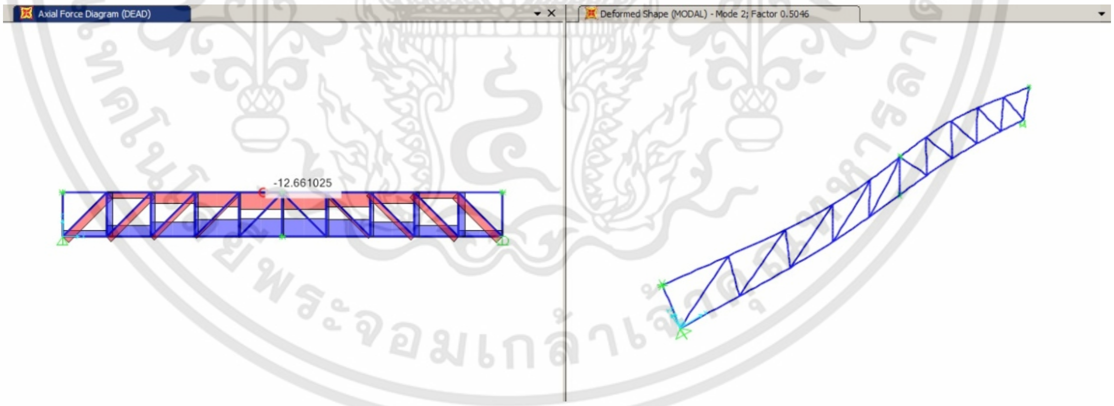
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 6.00 เมตร axial force 10385 N factor 1.57878

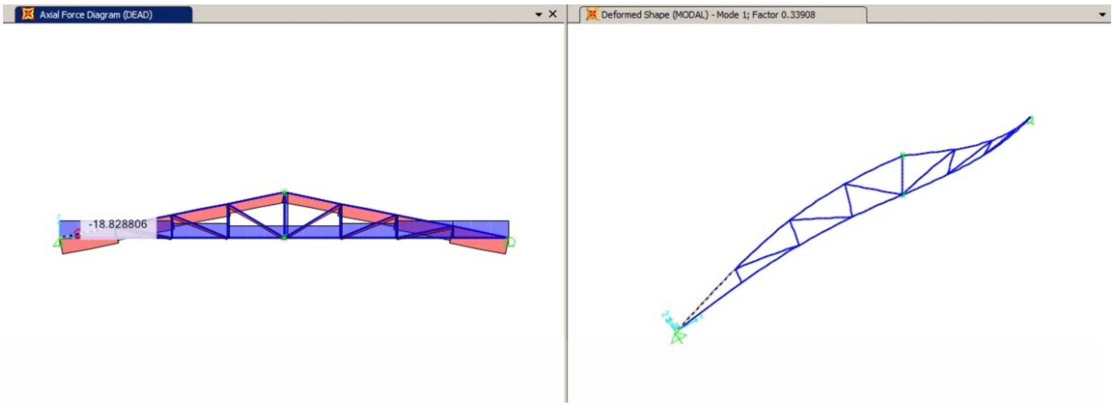



Pratt truss  span 10.00 เมตร axial force 13189 N factor 0.46012

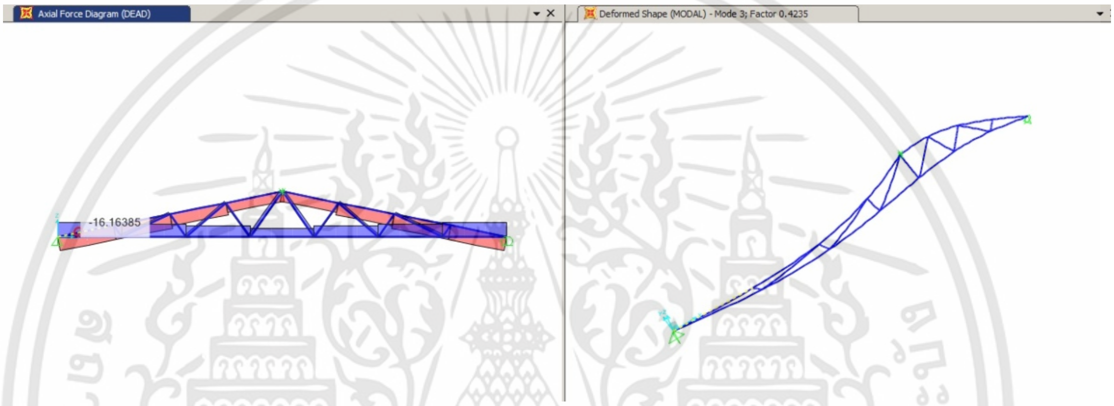



Howe truss  span 10.00 เมตร axial force 12661 N factor 0.5046

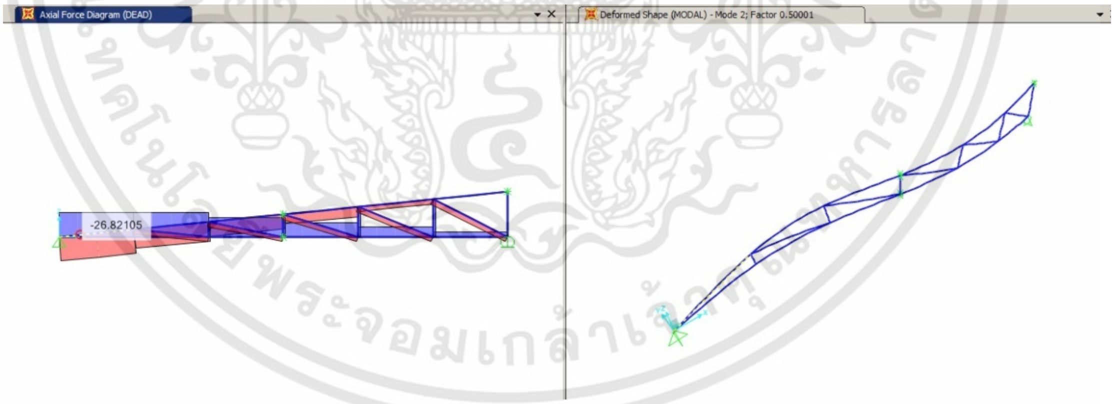
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 10.00 เมตร axial force 18830 N factor 0.33908

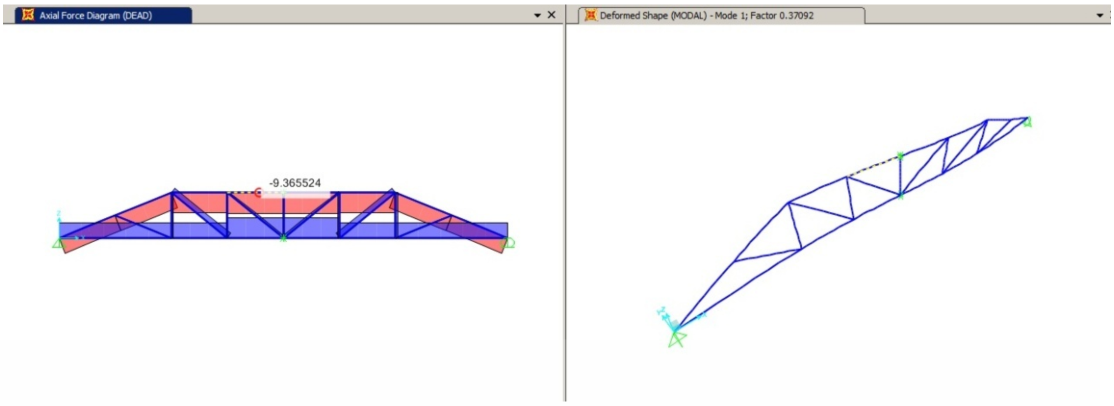



Triangle fink span 10.00 เมตร axial force 16165 N factor 0.4235

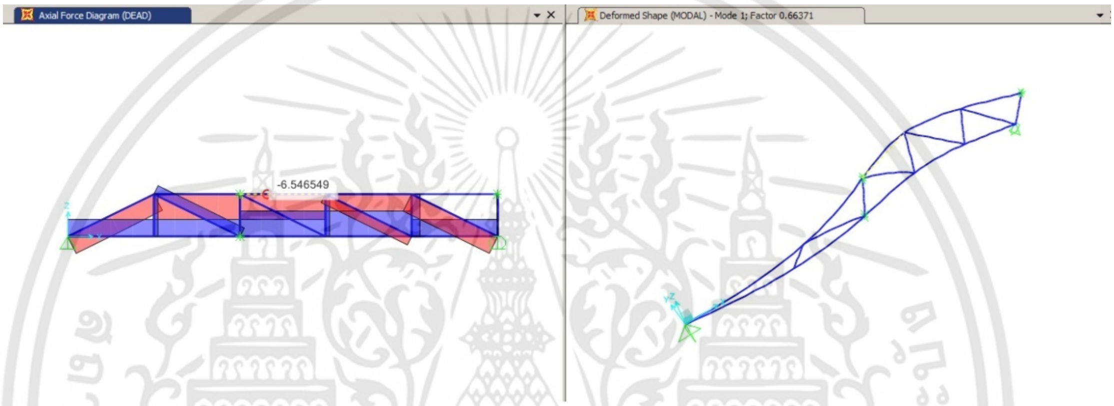



Mono pitch span 10.00 เมตร axial force 26822 N factor 0.50001

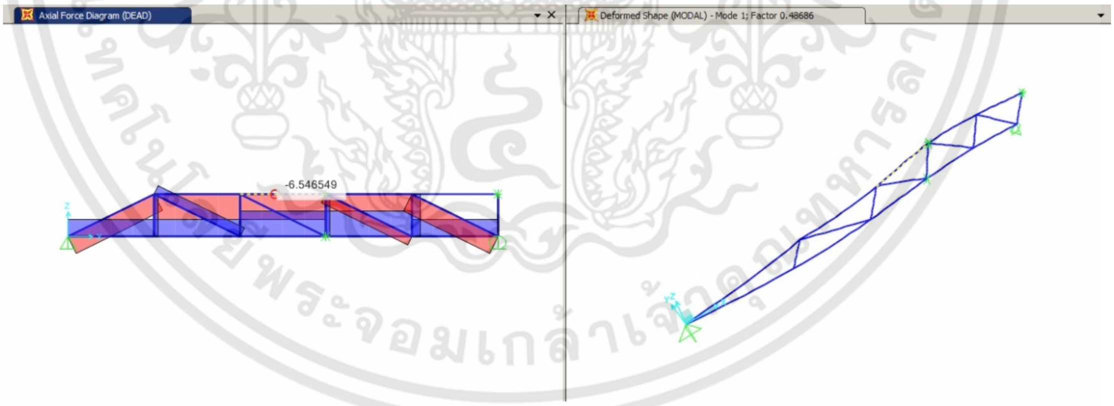
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 10.00 เมตร axial force 9366 N factor 0.37092

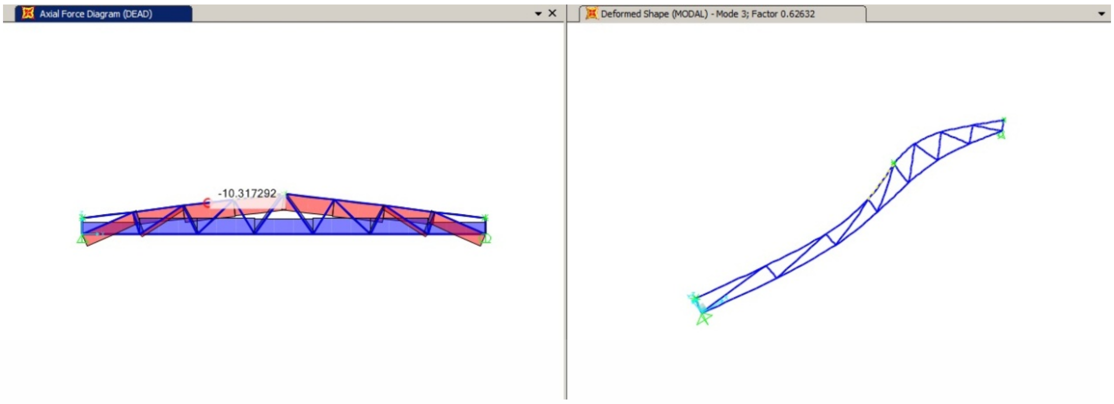



Half hip (front) span 10.00 เมตร axial force 6547 N factor 0.66371

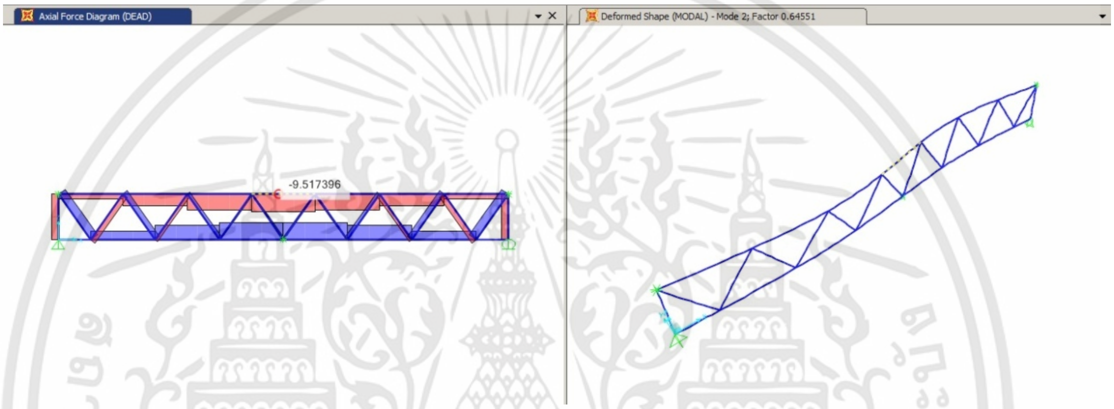



Half hip (rear) span 10.00 เมตร axial force 6547 N factor 0.48686

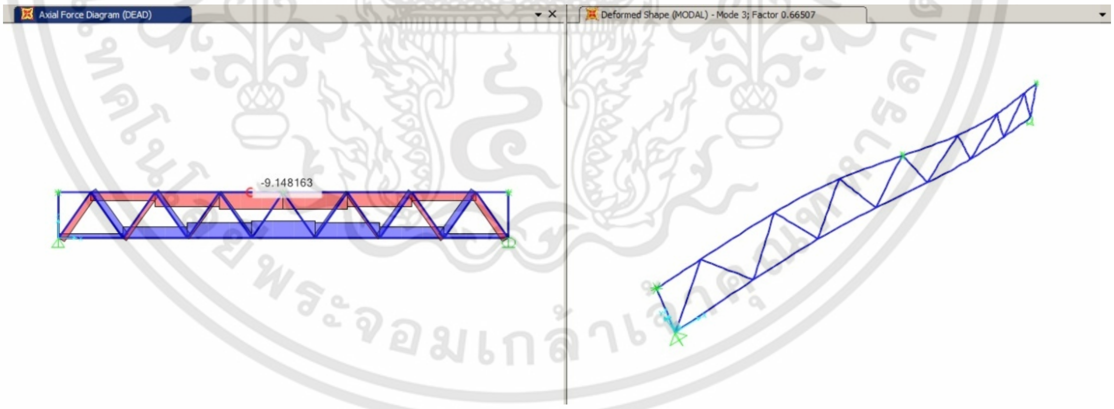
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 10.00 เมตร axial force 10318 N factor 0.62632

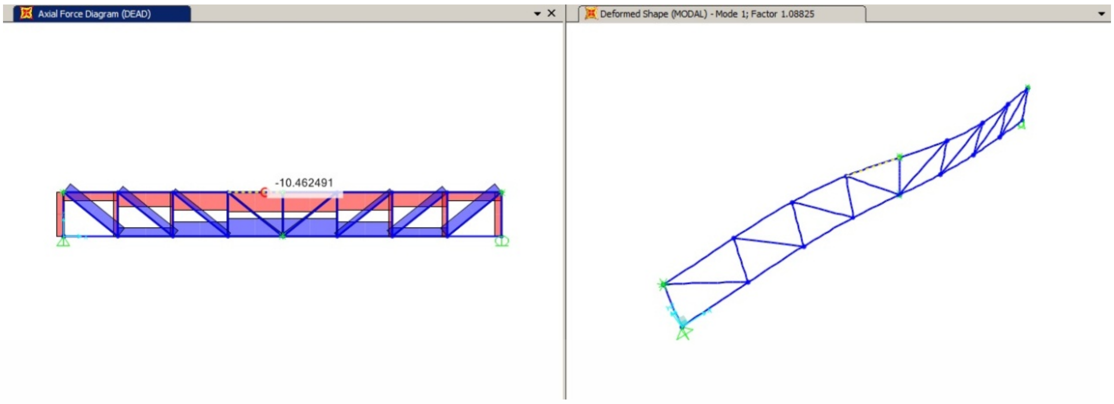



Foot bridge pratt span 10.00 เมตร axial force 9517 N factor 0.64551

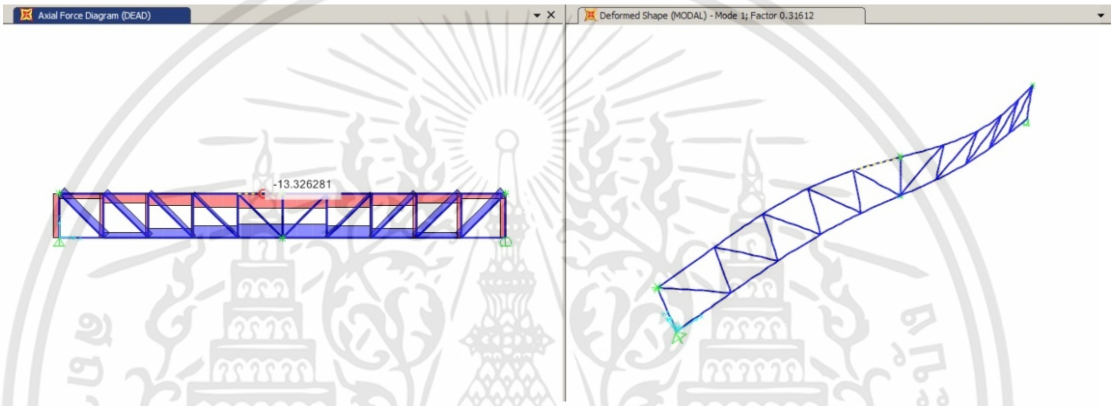



Foot bridge howe span 10.00 เมตร axial force 9148 N factor 0.66507

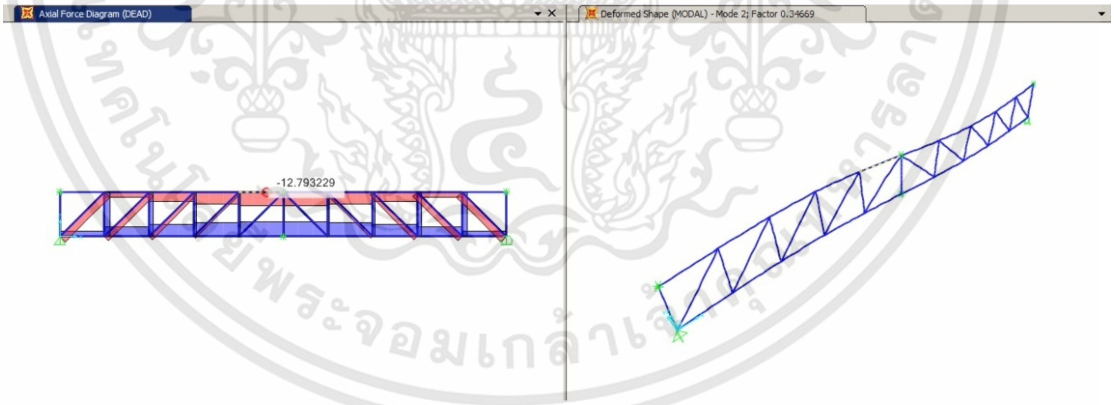
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Pratt truss span 7.20 เมตร axial force 10462 N factor 1.08825

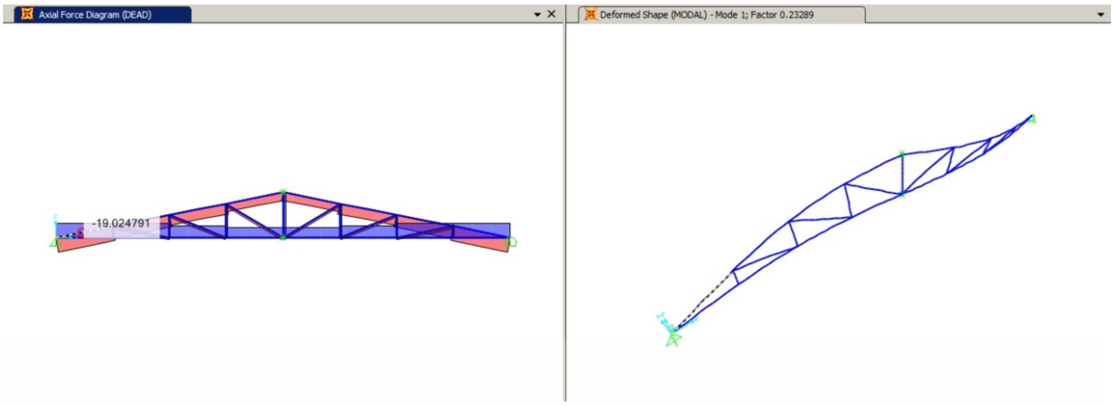



Pratt truss  span 12.00 เมตร axial force 13326 N factor 0.31612

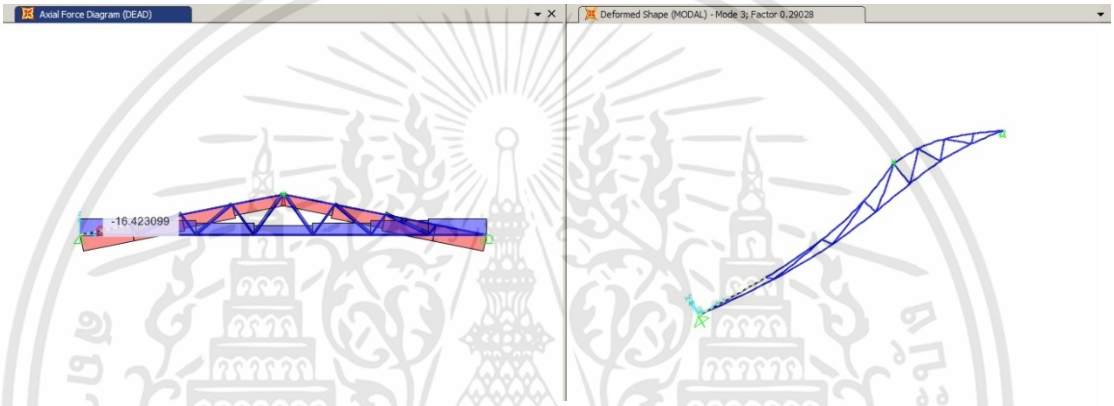



Howe truss  span 12.00 เมตร axial force 12793 N factor 0.34669

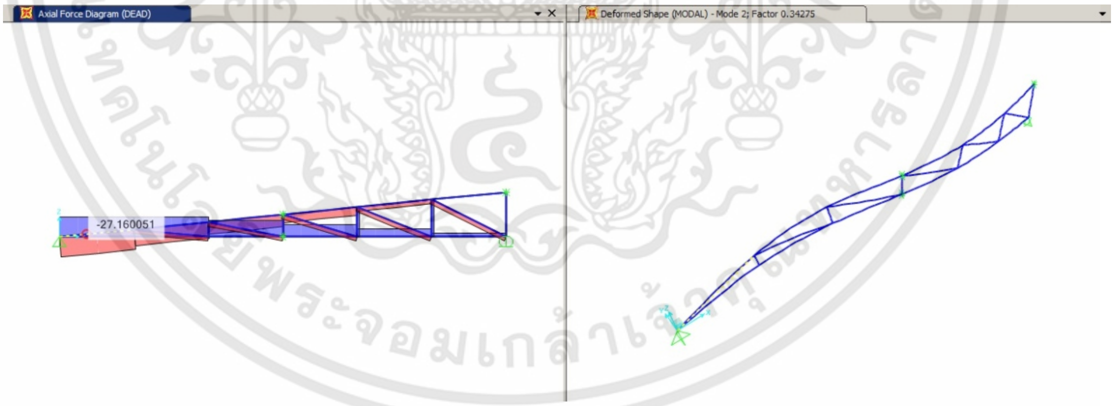
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Triangle howe span 12.00 เมตร axial force 19027 N factor 0.23289

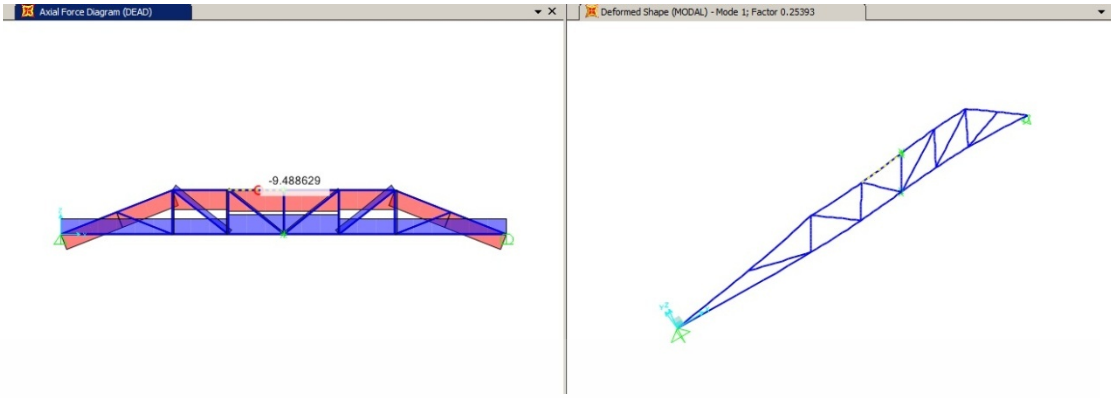



Triangle fink span 12.00 เมตร axial force 16425 N factor 0.29028

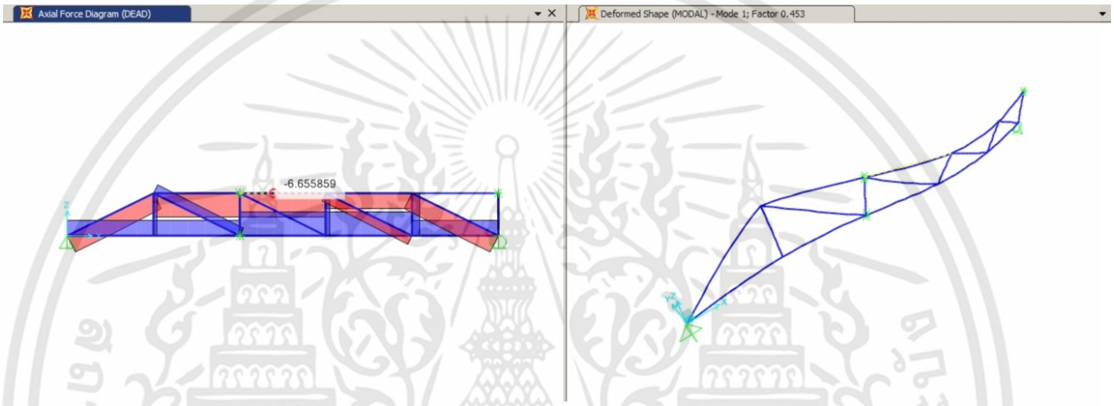



Mono pitch span 12.00 เมตร axial force 27161 N factor 0.34275

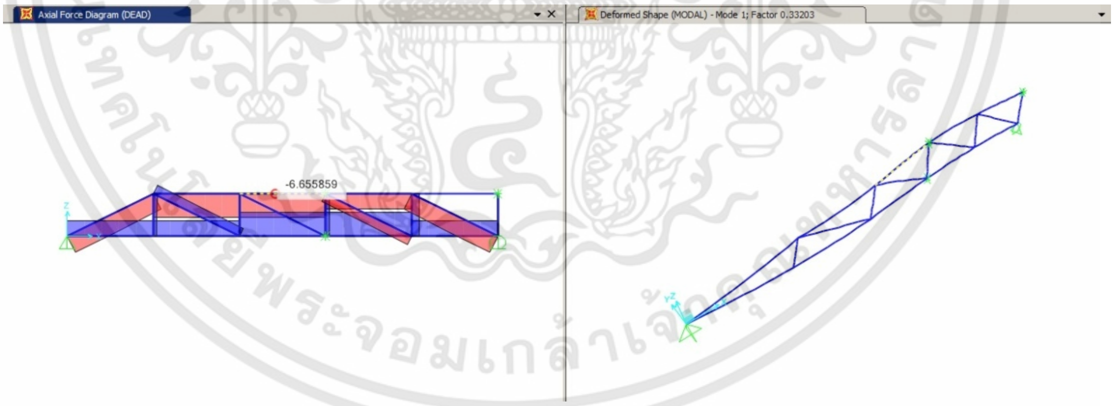
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Hip span 12.00 เมตร axial force 9489 N factor 0.25393

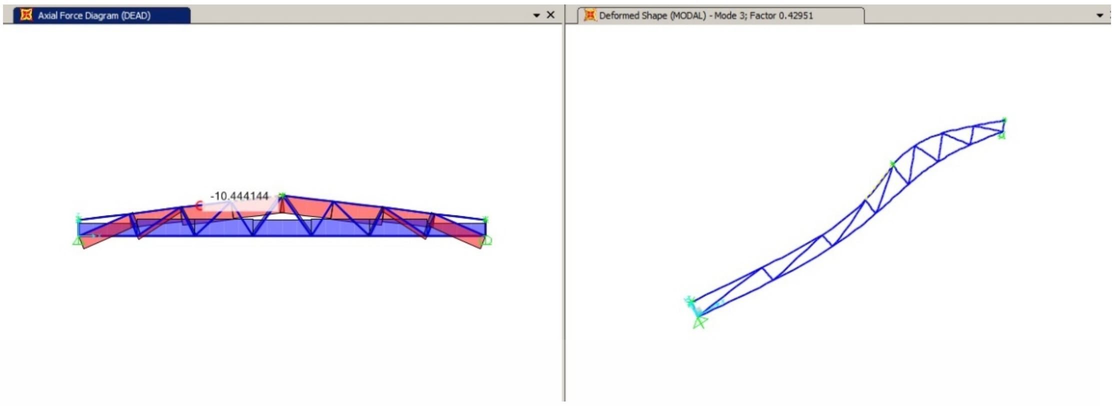



Half hip (front) span 12.00 เมตร axial force 6656 N factor 0.453

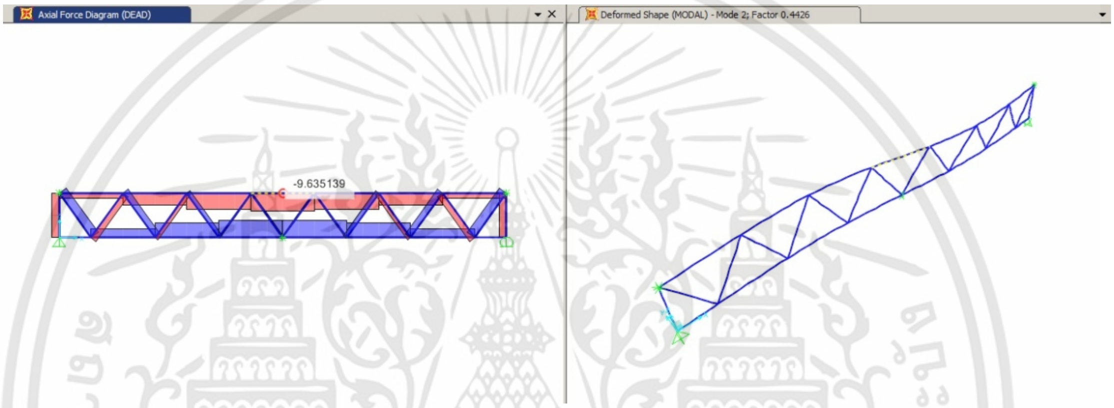



Half hip (rear) span 12.00 เมตร axial force 6656 N factor 0.33203

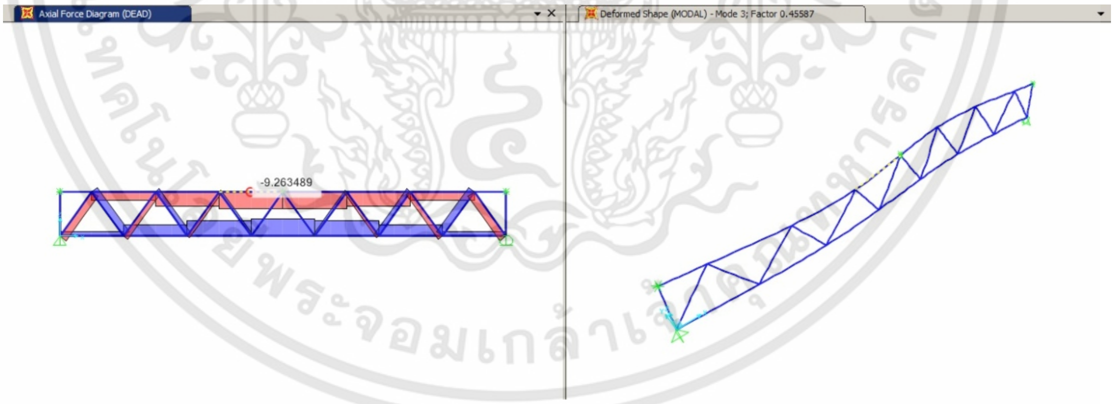
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




Double stub end span 12.00 เมตร axial force 10445 N factor 0.42951




Foot bridge pratt span 12.00 เมตร axial force 9635 N factor 0.4426




Foot bridge howe span 12.00 เมตร axial force 9263 N factor 0.45587

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| ชื่อ-นามสกุล | นายนพดล วิริยา |
| วัน เดือน ปีเกิด | 9 ธันวาคม 2534 |
| ที่อยู่ | 225/147 หมู่ 2 ถนน เชียงใหม่-ลำปาง<br>ตำบล หนองผึ้ง อำเภอ สารภี เชียงใหม่ 50140 |
| ประวัติการศึกษา | 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาโยธา<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง<br>2561 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโยธา<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ความชำนาญเฉพาะด้าน | 1.) การออกแบบโครงสร้าง<br>2.) การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ |

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

| | |
|---|---|
| พ.ศ.2558 | งานวิจัยหัวข้อ “การประมาณค่าการโก่งตัวของโครงถัก<br>โดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์” |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้