

## การศึกษาพฤติกรรมโครงถักที่ถ่ายแรงไม่ตรงจุดศูนย์กลางรวมแรงของโครงถัก

### The Behavior Studies of Truss with Eccentric Force

ศุภชัย ไทยพุ่ม\*, ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล 77110

\*Email: spcrmutr@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของโครงถักที่ถ่ายแรงไม่ตรงจุดศูนย์กลางรวมแรงของโครงถัก โดยทดสอบหาค่าน้ำหนักที่กระทำและการเสียรูปของโครงถักที่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง 0, 4, 8, 12 และ 16 เซนติเมตร เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าโครงถักที่เยื้องศูนย์กลางมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าโครงถักที่ไม่เยื้องศูนย์กลาง โดยค่าการรับน้ำหนักสูงสุดที่กึ่งกลางช่วงความยาวของโครงถักเยื้องศูนย์กลาง 4, 8, 12 และ 16 เซนติเมตร มีค่าลดลงร้อยละ 15.3, 51.1, 66.7 และ 76.6 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงถักที่ไม่เยื้องศูนย์กลาง นอกจากนี้พบว่าโครงถักที่เยื้องศูนย์กลางมีความเหนียวมากกว่าโครงถักที่ไม่เยื้องศูนย์กลาง โดยค่าการทรุดตัวที่กึ่งกลางช่วงความยาวของโครงถักเยื้องศูนย์กลาง 4, 8, 12 และ 16 เซนติเมตร ขณะรับน้ำหนักสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 75.76, 155.69, 293.11 และ 414.09 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงถักที่ไม่เยื้องศูนย์กลาง จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจะพบว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่าความแข็งแรงเทียบเท่ามากกว่าผลการทดสอบเฉลี่ยร้อยละ 29.6

**คำสำคัญ:** โครงถัก, แรงตามแนวแกน, การเสียรูป

#### Abstract

This research was to study the behavior of trusses which subject to the eccentric force. The trusses are tested, and load action and deformation of trusses are observed with eccentric distance of 0, 4, 8, 12 and 16 centimeter in order to compare with the results from finite element method. The results of eccentric trusses show equivalent stiffness value less than the case of non-eccentric trusses. The maximum load value at the center length of eccentric trusses 4, 8, 12 and 16 centimeter decrease 15.3, 51.1, 66.7 and 76.6 percent respectively when compare with non-eccentric trusses. Moreover, test results found that the eccentric trusses have more toughness than those from non-eccentric trusses. By observation the deflection at center length of eccentric trusses 4, 8, 12 and 16 centimeter, the deflection at maximum load is increasing 75.76, 155.69, 293.11 and 414.09 percent respectively when compare with non-eccentric trusses. From comparison results with analysis results by finite element program, it is seen that the analysis results has a more equivalent stiffness than the results from experiments average 29.6 percent.

**Keywords:** Truss, Axial Force, Deformation

## 1. ที่มาและความสำคัญ

โครงถัก (Truss) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโครงข้อหมุน เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการนำเอาชิ้นส่วนมาประกอบขึ้นเป็นรูปโครงสร้างแบบต่างๆ โดยยึดปลายทั้งสองของชิ้นส่วนต่างๆ ให้อยึดติดกันและสามารถถ่ายแรงให้กันได้โดยการเชื่อมต่อกัน หรือการใช้การเชื่อม โครงสร้างที่นิยมทำเป็นโครงถัก จะมีโครงสร้างสะพาน โครงสร้างหลังคา เป็นต้น การประกอบของโครงถักนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบระนาบโครงถัก (Plane Truss) เป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา แต่สามารถรับน้ำหนักได้มาก และวางพาดช่วงยาวๆ ได้อย่างเช่น โครงสร้างหลังคาของโรงงาน โรงอาหาร หอประชุม สนามกีฬา รวมทั้งสะพานและอาคารพิเศษอื่นๆ ด้วย โครงถักโดยทั่วไปจะทำจากเหล็ก รูปพรรณ หรือไม้ ในการออกแบบ

โครงสร้างประเภทนี้ จะประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนย่อยเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยจุดยึดหมุนได้ (Hinges) ซึ่งตัวนี้จะเป็นจุดศูนย์กลางรวมแรงตามแนวแกน (Axial Force) ขององค์ประกอบอาคาร เพื่อให้เกิดลักษณะเป็นรูปร่างแบบโครงสามเหลี่ยม (Triangulated Patterns) ในแต่ละชิ้นส่วนขององค์ประกอบนั้น จะรับเพียงแรงตามแนวแกนและแรงจะมีขนาดคงที่ตลอดความยาวของชิ้นส่วนนั้นๆ จุดรับแรงของโครงสร้างจะเป็นแบบหมุดได้ (Pinned) หรือแบบเลื่อนได้ (Roller) ซึ่งในการวิเคราะห์หรือออกแบบโครงสร้างส่วนใหญ่จะวิเคราะห์แบบโครงข้อหมุน แต่ในการก่อสร้างจริงแล้วแรงงานหรือช่างเชื่อมขาดความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมโยธา จึงมักนิยมนำชิ้นส่วนต่างๆ มาต่อกันเป็นโครงถักโดยไม่คำนึงถึงจุดศูนย์กลางรวมแรงตามแนวแกน

ลักษณะการเชื่อมต่อโดยแรงไม่ผ่านจุดศูนย์กลางรวมแรงตามแนวแกน (Axial Force) ขององค์อาคารนี้จะทำให้พฤติกรรมของโครงถักซึ่งชิ้นส่วนรับแค่แรงตามแนวแกนอย่างเดียว นั้นเปลี่ยนไปเป็นแบบรับแรงตามแนวแกนร่วมกับแรงดัด (Beam-Column) ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงถักนั้นลดลง

## 2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อเปรียบเทียบการรับน้ำหนักสูงสุดของโครงถักที่ถ่ายแรงผ่านจุดรวมแรงและไม่ผ่านจุดรวมแรง
- 2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการเสียรูปและการวิบัติของโครงถักที่ถ่ายแรงไม่ตรงจุดรวมแรง
- 2.3 เพื่อสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของโครงถักที่ถ่ายแรงไม่ผ่านจุดรวมแรงได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง

## 3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงข้อหมุน (Truss) คือ โครงสร้างที่นำเอาชิ้นส่วนมาประกอบขึ้นเป็นรูปโครงสร้างแบบต่างๆ โดยยึดปลายทั้งสองของชิ้นส่วนต่างๆ ให้อยึดติดกันและสามารถถ่ายแรงให้กันได้ด้วยการเชื่อม การใช้หมุดยึดหรือการใช้สลักเกลียว

ในการวิเคราะห์หาแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงข้อหมุน มีข้อสมมุติฐานที่สำคัญ [1] ดังนี้

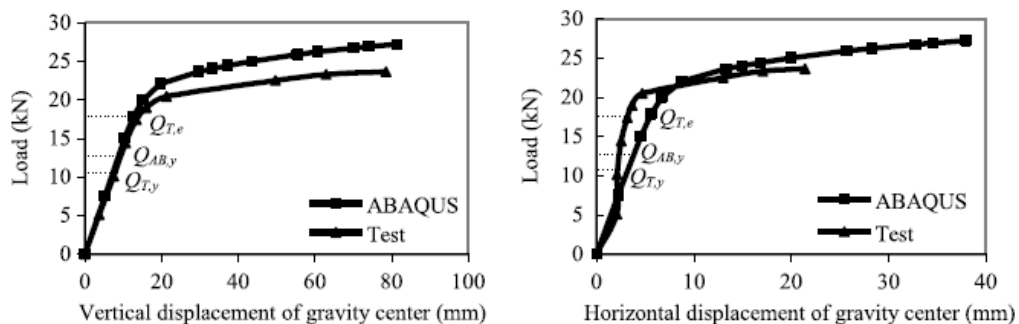
- 1) ชิ้นส่วนทุกชิ้นในโครงข้อหมุนจะต้องตรง
- 2) แนวเส้นรอยต่อของแต่ละชิ้นส่วนที่ต่อกันจะพบกันที่จุดศูนย์กลางของรอยต่อของชิ้นส่วน

3) น้ำหนักของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีค่าน้อยมากในการวิเคราะห์จะไม่นำมาเป็นองค์ประกอบในการพิจารณา

4) น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงข้อหมุนจะเป็นน้ำหนักแบบน้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point Load) ที่ตำแหน่งของข้อต่อเท่านั้น

แต่ในทางปฏิบัติมักไม่ได้ให้ความสนใจเรื่องแนวเส้นทรอยด์ของแต่ละชิ้นส่วนที่ต่อกันจะพบกันที่จุดศูนย์กลางของรอยต่อของชิ้นส่วน ทำให้เกิดแรงเยื้องศูนย์กลางซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายโครงข้อแข็งที่รับแรงดัดร่วมกับแรงตามแนวแกน ซึ่งจากผลการทดลองของ Teemu and Markku, 2014 [4] สำหรับโครงข้อหมุนที่จุดต่อเป็นแบบจุดหมุนกับเป็นยึดแน่นค่าแรงตามแนวแกนและค่าการเสีรูปร่างมีค่าต่างกันน้อยมาก จะแตกต่างกันมากเฉพาะค่าโมเมนต์เท่านั้นซึ่งค่าโมเมนต์ที่ต่างกันนี้เองเป็นผลทำให้เกิดการโก่งเดาะ (Buckling) ต่างกันตามไปด้วย และยังมีนักวิจัย S.H. Cho and S.L. Chan [3] พบว่าเหล็กฉากมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในโครงถักหลังคาและชิ้นส่วนค้ำยันของอาคาร ซึ่งการวิเคราะห์ในการออกแบบจุดเชื่อมต่อทั้งหมดถูกสมมติให้เป็นจุดหมุน (Hinge) ดังนั้นความยาวประสิทธิผลที่ถูกสมมติขึ้นจึงไม่ตรงกับความเป็นจริง เพราะในทางปฏิบัติจริงแล้วใช้วิธีการเชื่อมที่ปลายทั้งสองด้านของเหล็กฉาก พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงจึงไม่ใช่จุดหมุนเหมือนที่สมมติไว้ นอกจากนี้ใช้สลักเกลียวยึดจุดต่อไว้ ดังนั้นเหล็กฉากที่ยึดต่อโดยการเชื่อมจึงขัดแย้งกับผลจากการวิเคราะห์ เพราะโครงถักมีพฤติกรรมรับแรงอัดค่อนข้างซับซ้อน การเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนนั้นจะใช้วิธีการเชื่อม (weld) ซึ่งเมื่อมีการถ่ายแรงผ่านจุดเชื่อมสู่เหล็กฉากเดี่ยวจะไม่ผ่านแกนสะเทินของเหล็กฉาก ทำให้เกิดการวิบัติด้วยโก่งเดาะแบบ Distorsional ได้ง่ายเมื่อมีแรงมากพอ ซึ่งการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นสามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบได้เป็นอย่างดี

ในการทำนายพฤติกรรมของการเสีรูปร่างสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เช่นกัน โดย Hande Gokdemir and Nevzat Kirac. [2] แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของเหล็กฉากภายใต้แรงดัด และ แรงอัด 2 แกน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะยึดรั้งทางด้านข้างเหมือนกับจุดรองรับของคาน โดยจะมีแรงลงกระทำที่จุดกึ่งกลางความยาวคาน และแรงตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 4 จนกระทั่งเกิดการวิบัติ จากการศึกษาแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีขนาดที่เหมาะสมและการกำหนดเงื่อนไขของจุดรองรับด้วยวิธีวิเคราะห์พฤติกรรมและแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งผลการทดสอบและการวิเคราะห์ถูกนำมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 1

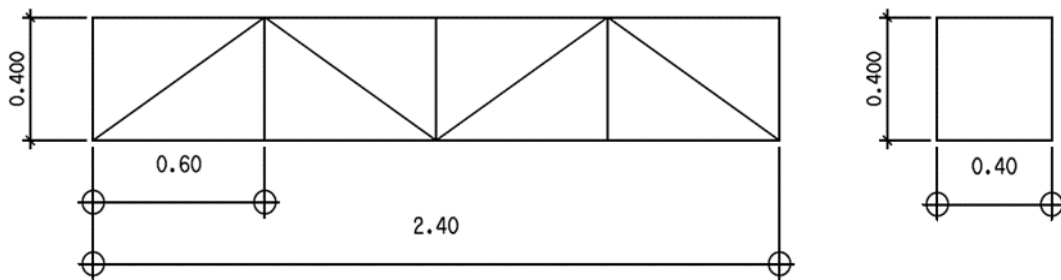


รูปที่ 1 ผลการทดสอบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมาก เช่นเดียวกับผลการทดสอบของ Yi Liu and Linbo Hui [5] และนอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อชิ้นส่วนของโครงสร้างมีระยะเยื้องศูนย์กลางที่มากขึ้นทำให้ความสามารถในการรับแรงสูงสุดลดลงไปด้วย

#### 4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 กำหนดรูปแบบโครงถักดังรูปที่ 2 โดยจุดต่อเป็นลักษณะการเชื่อมต่อแบบเยื้องศูนย์กลางและไม่เยื้องศูนย์กลาง โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) เท่ากับ 0, 4, 8, 12, และ 16 เซนติเมตร ทดสอบประเภทละ 2 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3 และการกำหนดรหัสตัวอย่างดังตารางที่ 1



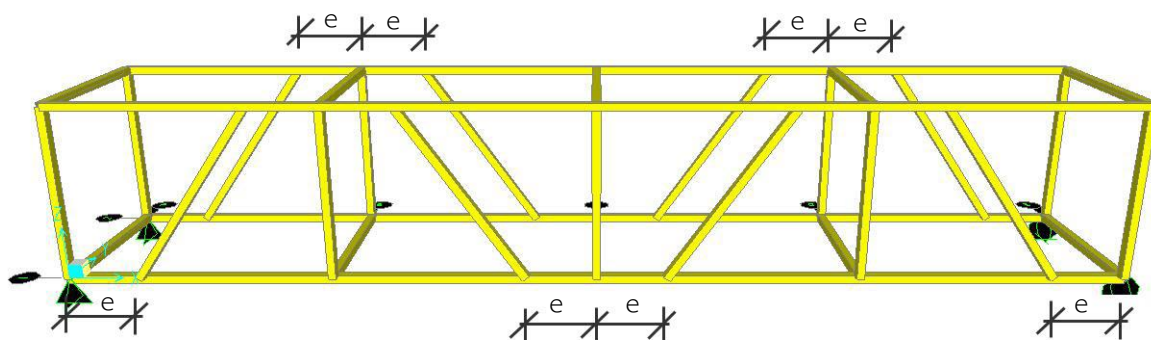
รูปที่ 2 รูปแบบโครงถัก

#### ตารางที่ 1 กำหนดรหัสโครงถัก

ประเภท	รหัส
โครงถักรูปแบบที่ 1 ไม่เยื้องศูนย์กลาง	T0
โครงถักรูปแบบที่ 2 เยื้องศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร	T4
โครงถักรูปแบบที่ 3 เยื้องศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร	T8
โครงถักรูปแบบที่ 4 เยื้องศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร	T12
โครงถักรูปแบบที่ 5 เยื้องศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร	T16

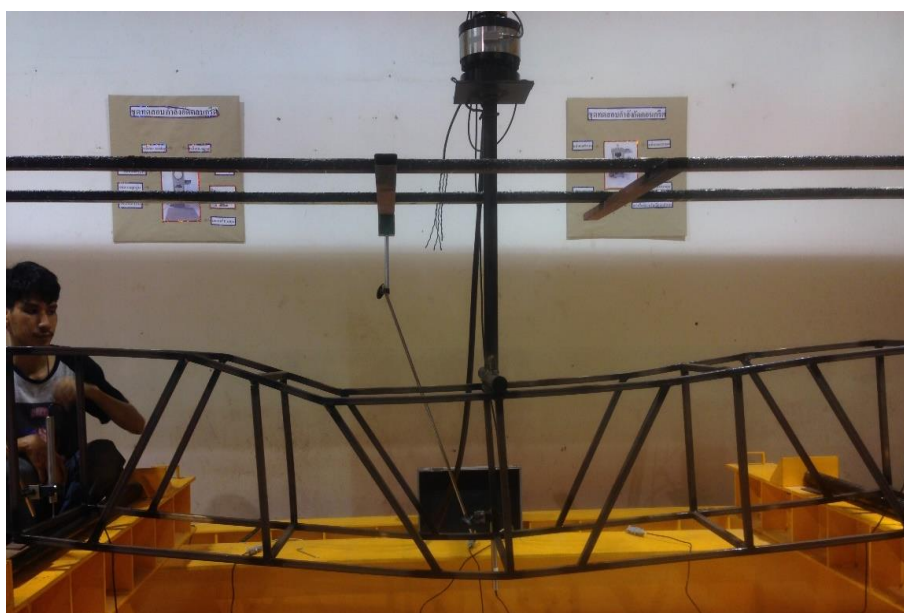
4.2 โครงถักประกอบขึ้นด้วยเหล็กกล่อง ขนาด 18.7x18.7x1.5 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติดังนี้

- 1) Modulus of Elasticity, E เท่ากับ 1,662,587.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- 2) Yield Tensile Stress, Fy เท่ากับ 4,449.44 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- 3) Ultimate Tensile Stress, Fu เท่ากับ 4,652.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3 ตำแหน่งการเอียงศูนย์ (e) ของชิ้นส่วนภายในโครงถัก

- 4.3 ติดตั้งเครื่องมือวัดค่าการเสียรูปที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงถัก และทดสอบโครงถักโดยการรับน้ำหนักบรรทุก ดังรูปที่ 4 จากนั้นบันทึกค่าน้ำหนัก ค่าการเสียรูปของโครงถัก และลักษณะการวิบัติของโครงถัก
- 4.4 สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำต่อโครงถัก และการเสียรูปที่เกิดขึ้น
- 4.5 จำลองโครงถักด้วยโปรแกรม SAP2000 โดยคำนึงถึงพฤติกรรมแบบเชิงเส้น



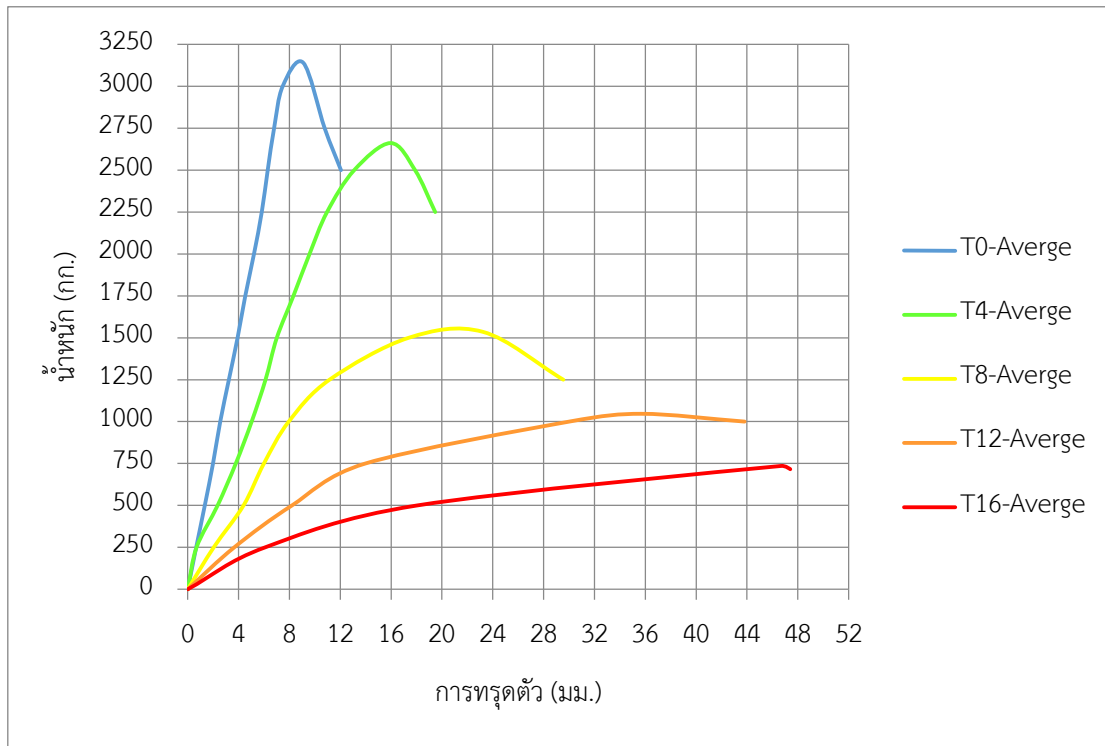
รูปที่ 4 การทดสอบโครงถัก

## 5. ผลและวิจารณ์

### 5.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักและการเสียรูปของโครงถัก

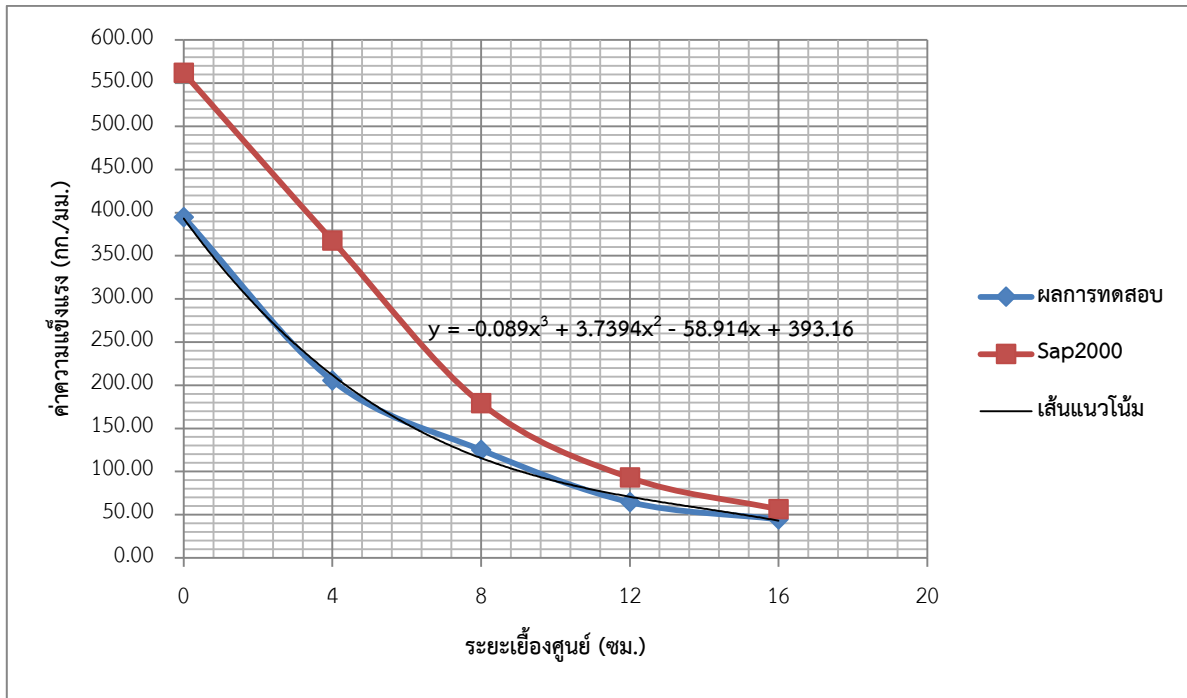
รูปที่ 5 แสดงให้เห็นผลการทดสอบการรับน้ำหนักของโครงถักที่มีระยะเอียงศูนย์และไม่เอียงศูนย์ พบว่าโครงถัก T0 ซึ่งไม่มีการเอียงศูนย์สามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุด 3,141 กิโลกรัม ส่วนโครงถัก T4, T8, T12 และ T16 สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้ 2,661.50, 1,535.50, 1,046.50 และ 735.50 กิโลกรัม ตามลำดับจากมากไปหาน้อย เมื่อนำผลค่าการทรุดตัวที่กึ่งกลางโครงถักมาเปรียบเทียบกันพบว่าเมื่อโครงถักไม่มีระยะเอียงศูนย์หรือมีระยะเอียงศูนย์

น้อยสามารถรับน้ำหนักได้สูง โดยมีลักษณะกราฟเป็นเส้นตรงในช่วงแรกจนถึงจุดรับน้ำหนักได้สูงสุดกราฟจะลดลงอย่างทันทีจนโครงสร้างวิบัติ แต่ในทางกลับกันโครงถักที่มีระยะเอียงศูนย์มากกราฟในช่วงแรกจะมีความชันน้อยและโค้งลดอย่างช้าๆ มีค่าการทรุดตัวที่กึ่งกลางโครงถักสูงขึ้นเรื่อยๆ ก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโครงถักที่มีรับแรงตรงศูนย์หรือมีระยะเอียงที่น้อยมีความแข็งแรงมากและไม่มีความเหนียว ส่วนโครงถักที่มีระยะเอียงศูนย์ที่มากจะมีความแข็งแรงน้อยแต่จะมีความเหนียวของโครงถักมากขึ้น



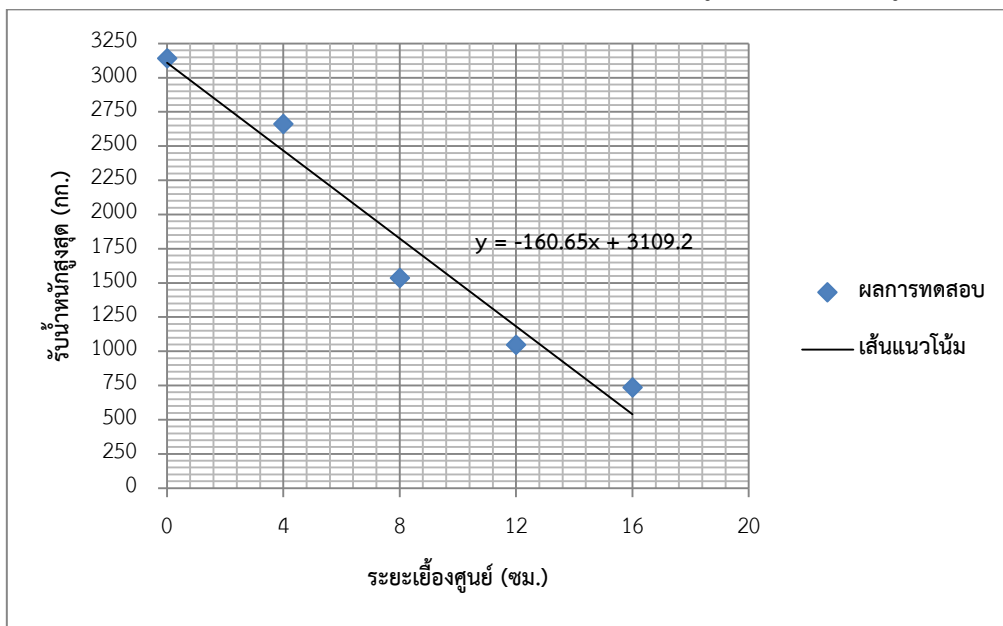
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักและการเสียรูปของโครงถัก

จากนั้นได้นำค่าความชันในช่วงแรกของกราฟแรกซึ่งเรียกว่า ความแข็งแรงเทียบเท่า ของโครงถักแต่ละตัวอย่างและจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีเชิงเส้นจากโปรแกรม Sap2000 มาเปรียบเทียบกันโดยเส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าค่าความแข็งแรงเทียบเท่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบให้ค่าที่สอดคล้องกัน คือเมื่อโครงถักมีระยะเอียงศูนย์เพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งแรงเทียบเท่าก็จะลดลงเป็นไปตามสามการโพลีโนเมียลกำลังสาม แต่การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ค่าสูงกว่าเฉลี่ย 31.07 เปอร์เซ็นต์ทุกตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและการเยื้องศูนย์ของโครงถัก

ค่าการรับน้ำหนักสูงสุดของโครงถักที่ทุกระยะการเยื้องศูนย์ต่างกันจะแตกต่างกันตามไปด้วย ดังกราฟในรูปที่ 7 โดยโครงถักจะมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้น้อยลงเมื่อโครงถักมีการเยื้องศูนย์เพิ่มมากขึ้น โดยค่าการรับน้ำหนักสูงสุดของโครงถักที่มีระยะเยื้องศูนย์ 4, 8, 12 และ 16 เซนติเมตร จะลดลงร้อยละ 15.30, 51.10, 66.70 และ 76.6 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับโครงถักที่ไม่มีระยะเยื้องศูนย์ ซึ่งการลดลงของการรับน้ำหนักสูงสุดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ โดยมีความชันการลดลงของสมการเท่ากับ 160 คูณกับระยะเยื้องศูนย์ของโครงถัก



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักสูงสุดเทียบกับระยะเยื้องศูนย์

## 5.2 ลักษณะการวิบัติของโครงถัก



รูปที่ 8 ลักษณะการเสียรูปของโครงถักที่ไม่เอียงศูนย์



รูปที่ 9 ลักษณะการเสียรูปของโครงถักที่เอียงศูนย์ 16 เซนติเมตร

โครงถักที่มีระยะเอียงศูนย์ 0, 4 เซนติเมตร โครงถักเกิดการวิบัติในลักษณะเซ (sway) ออกด้านข้างจึงทำให้เสียรูปเรียกว่า out-of-plan buckling จะเกิดกับชิ้นส่วนรับแรงอัด ส่วนที่ยึดต่อด้วยเชื่อมจะเสียรูปที่ชิ้นส่วน (member) และจุดต่อ (joint) ของโครงข้อหมุน ส่วนโครงถักที่มีระยะเอียงศูนย์ 8, 12 และ 16 เกิดการวิบัติที่ชิ้นส่วนด้านบนเกิดการแอ่นตัวลงอย่างเห็นได้ชัดและชิ้นส่วนด้านบนเกิดการโก่งตัวจนทำให้ชิ้นส่วนตรงที่โก่งตัวนั้นฉีกขาด



## 6. สรุปผล

6.1 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของโครงถักที่เยื้องศูนย์และไม่เยื้องศูนย์ พบว่าโครงถักที่ไม่เยื้องศูนย์สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด โครงถักมีการเยื้องศูนย์ค่ากำลังการรับน้ำหนักของโครงถักจะลดลงจากโครงถักที่ไม่เยื้องศูนย์ โดยโครงถักเยื้องศูนย์ 4, 8, 12 และ 16 เซนติเมตร รับน้ำหนักได้ลดลงร้อยละ 15.3, 51.1, 66.7 และ 76.6 ตามลำดับ

6.2 ลักษณะการวิบัติของโครงถักจะเห็นได้ว่าโครงถักไม่เยื้องศูนย์และเยื้องศูนย์ 4 เซนติเมตรเสียรูปโดยการเซ (Sway) ออกด้านข้างจึงทำให้เสียรูป และเยื้องศูนย์ 8 เซนติเมตร เสียรูปเกิดจากการแอ่นตัวและมีการโก่งตัวที่ด้านบน ส่วนโครงถักที่เยื้องศูนย์ 12 และ 16 เซนติเมตร เสียรูปโดยการแอ่นตัวและขึ้นส่วน (Member) บริเวณที่มีการโก่งนั้นฉีกขาด

6.3 ผลการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของโครงถักแบบเยื้องศูนย์ และไม่เยื้องศูนย์ โดยการใช้โปรแกรม SAP2000 และผลการทดสอบ จะเห็นได้ชัดว่า ผลการทดสอบจริงรับความแข็งแรงเทียบเท่า (Equivalent Stiffness) ของโครงสร้างได้น้อยกว่าผลการทดสอบด้วยโปรแกรม SAP2000 ทั้งแบบเยื้องศูนย์ และแบบไม่เยื้องศูนย์ ประมาณร้อยละเฉลี่ย 29.6

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] โสภณ วงศ์มีทรัพย์ และเกษม จารูปาน กลศาสตร์วิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรม กรุงเทพมหานคร (โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ)
- [2] Hande Gokdemir, Nevzat Kirac., 2011 Experimental and code based study of beam-column behaviour of equal leg single-angles. Journal of Constructional Steel Research, Volume 67, Issue 5, 780-789
- [3] S.H. Cho, S.L., 2005, Chan. Nonlinear analysis of angle trusses. Fourth International Conference on Advances in Steel Structures, Volume II, 1439-1443
- [4] Teemu T. and Markku H., "Tubular Steel Truss Design Using Semi-rigid Joints", COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING ©ASCE 2014, 1287-1294, 2014
- [5] Yi Liu, Linbo Hui., 2010, Finite element study of steel single angle beam-columns. Engineering Structures, Volume 32, Issue 8, 2087-2095