การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียวเพื่อค้นหารูปทรงและอัตราส่วนระยะห่างช่วงเสาต่อความลึกที่เหมาะสมในการออกแบบโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กโดยใช้โปรแกรม SSTAAD

พงศ์นธี มณีกุล*
มหาวิทยาลัยนครพนม ต.หนองญาติ อ.เมือง จ.นครพนม 48000

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรม SSTAAD ซึ่งใช้อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว เพื่อค้นหารูปทรงและอัตราส่วนระยะห่างช่วงเสาต่อความลึกที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็ก โดยมีสมการเป้าหมายคือ ฟังก์ชันน้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เบาที่สุด จากกลุ่มชิ้นส่วน 4 กลุ่ม คือ ชิ้นส่วนคอร์ดบน-คอร์ดล่าง ชิ้นส่วนแนวทแยง ชิ้นส่วนแนวตั้ง และชิ้นส่วนบริเวณจุดรองรับ โดยมีตัวแปรออกแบบจำนวน 9 ตัวแปร การวิเคราะห์โครงสร้างใช้ระเบียบวิธีจำกัดเพื่อหาการเสียรูปของจุดต่อและแรงภายในของทุกชิ้นส่วน แล้วจึงตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (ASD) ตามมาตรฐานของ AISC ตามสมการเงื่อนไขไร้เชิงเส้นจำนวน 13 สมการ โดยกำหนดช่วงของคำตอบที่เป็นไปได้จากอัตราส่วนของระยะห่างช่วงเสาต่อความลึกของโครงข้อหมุนให้มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 40 ทดสอบระยะห่างช่วงเสาตั้งแต่ 10 ถึง 40 เมตร และความลาดชันหลังคาตั้งแต่ 5 ถึง 40 องศา จากจำนวนโครงหลังคา 190 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่า รูปทรงของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสมมากที่สุด 3 รูปทรงแรก คือ Scissor, Girder และ Trapezoid เท่ากับร้อยละ 67.9, 13.2 และ 11.6 ตามลำดับ รูปแบบการถักที่เหมาะสม คือ Pratt, Warren และ Howe เท่ากับร้อยละ 74.2, 24.2 และ1.6 ตามลำดับ อัตราส่วนระยะห่างช่วงเสาต่อความลึกที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่มีน้ำหนักเบาที่สุด มีค่าอยู่ระหว่าง 17 ถึง 25

คำสำคัญ : โครงข้อหมุนหลังคาเหล็ก / การออกแบบที่เหมาะสม / อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว / รูปทรงโครงข้อหมุน

* *Corresponding Author : psm__york@hotmail.com*
อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

Application of Simulated Annealing Algorithm for Finding Optimal Shape and Optimal Span-to-Depth Ratio for Steel Roof Trusses Design by using SSTAAD Program

Pongnathee Maneekul[1]

Nakhon Phanom University, NongYat, Muang District, Nakhon Phanom 48000

Abstract

This paper presents an application of SSTAAD program by using a proposed simulated annealing algorithm for finding optimal truss shape and optimal span-to-depth ratio of roof steel trusses. The objective function was the lowest weight per unit length of roof steel trusses. The structure items taken into account were grouped as: i) upper and lower chords, ii) diagonal web, iii) vertical web, and iv) support web, and nine design variables were formulated. The finite element method was employed to calculate nodal displacement and internal force of all the structure members. The numerical algorithm then searched for optimal design parameters with thirteen non-linear design constraints based on the Allowable Stress Design (ASD) method, following the American Institute of Steel Construction (AISC) standard. One hundred and ninety roof truss samples were tested with the span-to-depth ratios ranged from 10 to 40, span space ranged from 10 to 40 metres, and roof slopes ranged from 5 to 40 degrees. The results showed that the top three best roof truss shapes were scissor, girder, and trapezoid shape, with the sample percentage of 67.9, 13.2 and 11.6, respectively. The best diagonal type was pratt, followed with warren and howe, with the sample percentage of 74.2, 24.2, and 1.6, respectively. The optimal span-to-depth ratios returning lightest roof structures ranged from 17 to 25.

Keywords : Roof Steel Trusses / Optimal Design / Simulated Annealing Algorithm / Truss Shape

* *Corresponding Author : psm__york@hotmail.com*

Lecturer, Division of Civil Engineering, Faculty of Industrial Technology.

1. บทนำ

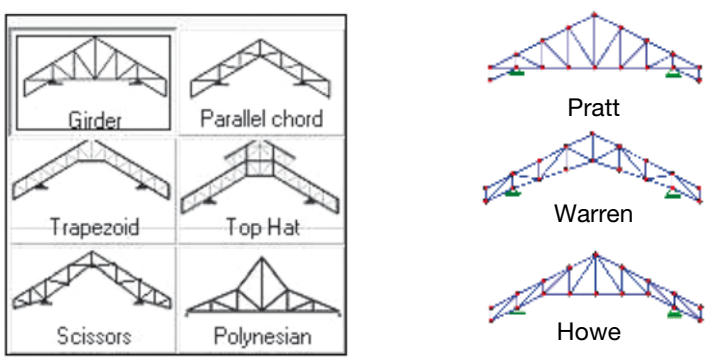
โครงข้อหมุน (Truss) หมายถึง โครงสร้างที่ประกอบขึ้นจากการนำชิ้นส่วนหลายๆ ชิ้นมาประกอบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดเสถียรภาพขึ้น สถาปนิกและวิศวกรมักนิยมออกแบบโครงข้อหมุนเหล็กเพื่อใช้เป็นโครงสร้างหลังคาของอาคารที่มีระยะห่างช่วงเสา (Span) ที่ค่อนข้างมาก เนื่องจากสามารถออกแบบให้มีความประหยัดและก่อสร้างง่าย รูปทรงของโครงข้อหมุนเหล็กที่ได้รับความนิยมใช้งานมีหลากหลายรูปทรง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นรูปทรงตามที่สถาปนิกได้กำหนดไว้ในแบบรูปทางสถาปัตยกรรม ซึ่งเมื่อวิศวกรโครงสร้างนำรูปทรงดังกล่าวมาออกแบบ จะต้องสร้างแบบจำลองของโครงข้อหมุนเพื่อวิเคราะห์หาแรงภายในที่เกิดขึ้นแล้วจึงออกแบบขนาดชิ้นส่วนต่างๆ ให้เป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนดของการออกแบบ ซึ่งขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบที่จะกำหนดความลึกของโครงข้อหมุนเพื่อให้สามารถต้านทานการเสียรูปได้ไม่เกินค่าที่ยอมให้ ซึ่งบางครั้งรูปทรงทางสถาปัตยกรรมที่สถาปนิกกำหนดมาให้อาจจะกำหนดความลึกของโครงข้อหมุนมากเกินไป ทำให้โครงข้อหมุนที่ออกแบบได้มีน้ำหนักมาก ส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าก่อสร้าง หรือในทางตรงกันข้าม ถ้าหากกำหนดความลึกของโครงข้อหมุนน้อยเกินไปก็อาจจะทำให้การเสียรูปของโครงข้อหมุนสูงเกินกว่าค่าที่ยอมให้ ทำให้ต้องออกแบบใหม่ โดยการกำหนดขนาดความลึกของโครงข้อหมุนใหม่แล้วจึงวิเคราะห์และออกแบบอีกครั้ง ซึ่งจะส่งผลให้ใช้เวลาในการออกแบบเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแล้ว ถ้าหากสถาปนิกหรือวิศวกรทราบถึงความลึกที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนกับระยะห่างช่วงเสาและความลาดชันของหลังคา จะช่วยให้การออกแบบมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น และได้ขนาดของโครงข้อหมุนที่ทำให้ประหยัดต้นทุนค่าก่อสร้างงานเหล็กโครงหลังคาได้

หลายสิบปีมานี้ การหาคำตอบที่เหมาะสมได้รับความนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในศาสตร์ที่หลากหลายสาขา การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมก็เป็นอีกแขนงหนึ่งที่นิยมใช้วิธีการออกแบบที่เหมาะสมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดในหลากหลายประเภทของงาน ยกตัวอย่างเช่น Tapown และคณะ [1] ที่ใช้อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียวในการออกแบบที่เหมาะสมของเสา ค.ส.ล. หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงดัดสองทาง หรืองานวิจัยของ Wongsa-nga และคณะ [2] ที่ประยุกต์ใช้วิธีฮิลไคลมิ่งเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในงานคอนกรีต และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการออกแบบที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนเหล็ก ซึ่งมีทั้งการค้นหารูปทรง [5, 9], การค้นหาขนาดและขนาดชิ้นส่วน [3-10], การค้นหารูปแบบการถัก [7] เป็นต้น

การออกแบบความลึกที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กสามารถทำได้โดยทดลองเปลี่ยนความลึกของโครงหลังคาแล้วจึงวิเคราะห์หาแรงภายในที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงแบ่งกลุ่มของชิ้นส่วนเพื่อออกแบบขนาดชิ้นส่วน ท้ายที่สุด คำนวณน้ำหนักรวมของโครงข้อหมุนเพื่อเปรียบเทียบกับโครงข้อหมุนอื่นที่มีความลึกแตกต่างกัน ดังเช่น งานวิจัยของ Jiravacharadej [3] ใช้โปรแกรม Grasp เพื่อหาความลึกที่เหมาะสมของโครงหลังคาแบบแพรท (Pratt) ที่มีช่วงความยาวของโครงหลังคาระหว่าง 10 ถึง 30 เมตร และระยะห่างระหว่างโครงหลังคา (bay) เท่ากับ 5 เมตร พบว่า อัตราส่วนระหว่างช่วงระยะห่างเสาต่อความลึกของโครงข้อหมุน (L/x_1) ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 25 ถึง 37.5 ($25 \leq \frac{L}{x_1} \leq 37.5$) นอกจากนี้ Chetchotisak [4] ได้นำเสนอรายงานการวิจัยผลการวิเคราะห์และออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข้อหมุนหลังคาแบบแพรท (Pratt) โดยใช้แบบจำลองคาน Timoshenko เพื่อวิเคราะห์หาแรงภายในและการแอ่นตัวของโครงข้อหมุน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MATHCAD ในการหาคำตอบที่เหมาะสมของระบบสมการไร้เชิงเส้น พบว่า กระบวนการออกแบบที่เหมาะสมจะได้โครงข้อหมุนที่น้ำหนักเบากว่าวิธีการออกแบบโดยการสมมุติสัดส่วนช่วงความยาวต่อความลึก และนอกจากนี้แล้ว จากผลการวิเคราะห์ความไว พบว่า น้ำหนักของโครงข้อหมุนหลังคาที่เบาที่สุดจะแปรผันตามจำนวนช่อง (N-panel) ของโครงข้อหมุน ในขณะที่มุมลาดชันของหลังคามีผลต่อคำตอบที่เหมาะสมน้อยมาก นอกจากนี้แล้ว การออกแบบโครงข้อหมุนที่เหมาะสม ยังพบว่า มีทั้งการค้นหารูปร่างที่เหมาะสม อาทิ เช่น รายงานการวิจัยของ Gil และ Andreu [5] ซึ่งต้องใช้เทคนิคการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดผสมผสานกันหลายวิธี จึงสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนทั้งในด้านรูปทรง, ขนาดของชิ้นส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด เพื่อ

ให้ได้โครงข้อหมุนหลังคาที่มีน้ำหนักเบาที่สุดหรือใกล้เคียง แต่อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ โดยส่วนใหญ่มักจะค้นหาคำตอบที่เหมาะสมภายใต้รูปทรงของโครงข้อหมุนหลังคาเพียงรูปทรงเดียว เช่นเดียวกันกับ Maneekul และ Thepputhangkoon [6] ที่ได้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบโครงข้อหมุนเหล็กที่มีน้ำหนักเบาที่สุดโดยอัตโนมัติโดยใช้คอมไพเลอร์ VB6 เรียกว่าโปรแกรม Structural Steel Truss Automatic Analysis & Design หรือเรียกย่อว่า โปรแกรม SSTAAD เพื่อใช้วิเคราะห์โครงข้อหมุนโดยใช้ระเบียบวิธีจำกัด (Finite Element Method, FEM) และออกแบบขนาดชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนเหล็กรูปทรงโค้ง (Arch Truss) โดยใช้วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD) ร่วมกับการใช้อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing, SA) ในการค้นหาขนาดและชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนที่ทำให้น้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุนใกล้เคียงค่าที่เบาที่สุด พบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ออกแบบโครงข้อหมุนรูปทรงโค้งได้ประหยัดเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 14.6 ซึ่งในบทความดังกล่าวเป็นการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนหลังคารูปทรงโค้งเพียงรูปทรงเดียวเท่านั้น

ดังนั้นแล้ว บทความฉบับนี้ได้เพิ่มการพัฒนาโปรแกรม SSTAAD ในเวอร์ชั่น 2015 ให้สามารถค้นหารูปทรงและความลึกที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนที่มีรูปทรงหลากหลายยิ่งขึ้น จำนวนทั้งสิ้น 6 รูปทรง รวมทั้งค้นหารูปแบบการถักที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และรูปที่ 1(ข) ตามลำดับ โดยเลือกรูปทรงโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่ได้รับความนิยมใช้ในการออกแบบในงานก่อสร้างจริง เพื่อเป็นแนวทางให้กับสถาปนิกหรือวิศวกรสำหรับใช้ในการกำหนดรูปทรงของโครงหลังคาและความลึกของโครงข้อหมุนหลังคาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้น้ำหนักเบาที่สุดหรือใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดและผ่านเกณฑ์การออกแบบ แต่อย่างไรก็ตาม ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด มักจะต้องใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเป็นเวลานาน ถ้าหากกำหนดขอบเขตของการค้นหาที่กว้างมากเกินไปอาจทำให้ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่นาน หรือในบางครั้งอาจจะทำให้ได้คำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimal) ดังนั้น ถ้าหากผู้ออกแบบสามารถรู้ระยะความลึกของโครงข้อหมุนซึ่งสัมพันธ์กับระยะห่างของช่วงเสาที่จะทำให้สามารถออกแบบได้โครงข้อหมุนที่มีน้ำหนักเบาที่สุดได้ ก็จะทำให้กำหนดขอบเขตของการค้นหาคำตอบที่แคบลง อาจทำให้อัลกอริทึมสามารถใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดได้เร็วขึ้น ดังนั้นแล้ว บทความฉบับนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การค้นหารูปทรงของโครงข้อหมุนและความลึกของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสม โดยในเบื้องต้นในบทความฉบับนี้ได้กำหนดขอบเขตของคำตอบที่จะค้นหาโดยการกำหนดอัตราส่วนของช่วงระยะห่างเสาต่อความลึกของโครงข้อหมุนให้มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 40 ($10 \le \frac{L}{x_1} \le 40$) เพื่อให้ครอบคลุมคำตอบที่ดีที่สุดที่อาจเป็นไปได้



(ก) รูปทรงโครงข้อหมุนหลังคา (ข) รูปแบบการถัก

รูปที่ 1 รูปทรงของโครงข้อหมุนที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

2. วิธีการดำเนินงาน

1. พัฒนาโปรแกรม SSTAAD เวอร์ชั่น 2015 [6] เพื่อวิเคราะห์หาแรงภายในของแต่ละชิ้นส่วนและการเคลื่อนที่ของจุดต่อของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กโดยใช้ระเบียบวิธีจำกัด (FEM) และออกแบบขนาดและชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่มีน้ำหนักต่อความยาวเบาที่สุดโดยอัตโนมัติตามมาตรฐาน AISC ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดดังรายละเอียดในงานวิจัยที่ผ่านมา [6] และในบทความฉบับนี้ได้ศึกษาโดยละเอียดเฉพาะเงื่อนไขของโครงข้อหมุนดังต่อไปนี้

1.1) โครงข้อหมุนที่ศึกษาเป็นโครงข้อหมุนแบบช่วงเดียวที่มีปลายข้างหนึ่งเป็นจุดรองรับแบบยึดหมุน (Hinge support) และปลายอีกด้านเป็นจุดรองรับแบบเคลื่อนที่ได้ (Roller support) และมีระยะห่างระหว่างโครงข้อหมุนหลัก (Bay) เท่ากับ 4.0 เมตร เท่านั้น

1.2) แรงกระทำในแนวดิ่ง ประกอบด้วย น้ำหนักกระเบื้องหลังคาเหล็ก (Metal sheet) ที่มีน้ำหนักไม่เกิน 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร. และน้ำหนักของแปเหล็กตัวซีแบบบางขนาด 4 นิ้ว หนา 2.8 มิลลิเมตร ที่มีระยะเรียงไม่เกิน 1.10 เมตร, น้ำหนักของฝ้าเพดานและอุปกรณ์แขวนไม่เกิน 30 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เท่านั้น ซึ่งแรงดังกล่าวได้ถูกจำลองให้กระทำกับโครงข้อหมุนในลักษณะ Global distributed load กระทำต่อชิ้นส่วน Upper chord ของโครงข้อหมุน

1.3) แรงลมกระทำตั้งฉากกับแนวหลังคาเพียงด้านเดียว โดยใช้แรงลมตามข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐาน ว.ส.ท. ที่ระยะความสูงไม่เกิน 10 เมตร เท่ากับ 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ลักษณะของแรงกระทำต่อโครงข้อหมุนเป็นแบบ Local distributed load กระทำต่อชิ้นส่วน Upper chord ของโครงข้อหมุน

1.4) หน้าตัดที่เลือกใช้ในการออกแบบเป็นท่อเหล็กกลมกลวงและต่อโดยการเชื่อมเท่านั้น ดังนั้น จึงกำหนดให้ชิ้นส่วนคอร์ดบน-คอร์ดล่าง จะต้องเป็นชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นส่วนอื่น เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

2. ค้นหารูปทรง (Truss shape) ที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กจากจำนวน 6 รูปทรง ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) ได้แก่ Girder, Parallel Chord, Trapezoid, Top Hat, Scissor และ Polynesian และค้นหารูปแบบการถักที่เหมาะสมของโครงข้อหมุน 3 รูปแบบ คือ Pratt, Warren และ Howe ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ที่ทำให้โครงข้อหมุนหลังคาเหล็กมีน้ำหนักเบาที่สุด โดยมีขอบเขตของระยะห่างช่วงเสา (S) และมุมลาดชันของหลังคาซึ่งแตกต่างกัน ดังนี้

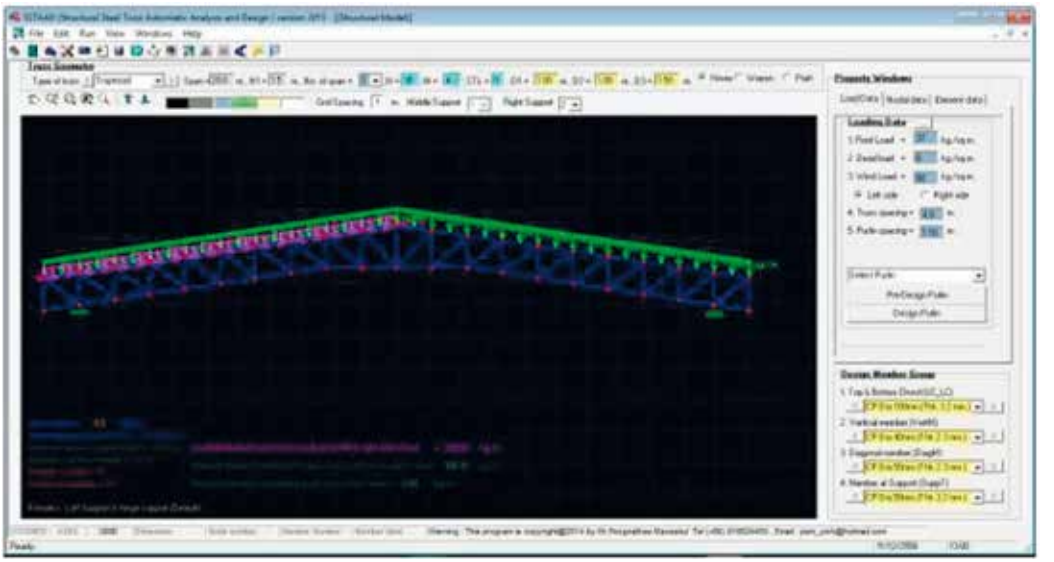
- S = 10 เมตร มุมลาดชันหลังคา 5 - 40 องศา
- S = 15 เมตร มุมลาดชันหลังคา 5 - 40 องศา
- S = 20 เมตร มุมลาดชันหลังคา 5 - 30 องศา
- S = 25 เมตร มุมลาดชันหลังคา 5 - 25 องศา
- S = 30 เมตร มุมลาดชันหลังคา 5 - 20 องศา
- S = 35 เมตร มุมลาดชันหลังคา 5 - 20 องศา
- S = 40 เมตร มุมลาดชันหลังคา 5 - 20 องศา

โดยที่ในแต่ละระยะห่างช่วงเสา และความลาดชันของหลังคา ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง บันทึกค่าความลึกของโครงข้อหมุน.รูปแบบโครงข้อหมุน, รูปแบบการถักและน้ำหนักของโครงข้อหมุน เพื่อหาค่าต่ำสุด, ค่าเฉลี่ย และค่าสูงสุด ที่อัลกอริทึม SA ค้นพบโครงข้อหมุนที่มีน้ำหนักเบาที่สุด

3. สรุปและวิเคราะห์ผล

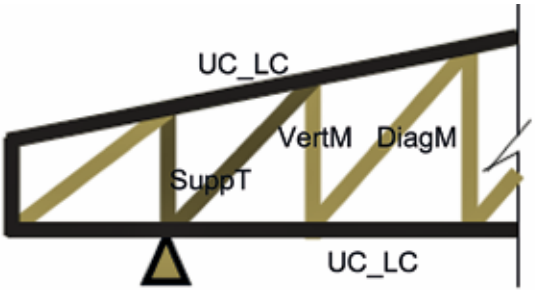
3. โปรแกรม SSTAAD เพื่อวิเคราะห์และออกแบบโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กโดยอัตโนมัติ

โปรแกรม SSTAAD เป็นโปรแกรมประยุกต์สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กโดยอัตโนมัติ [6] และในบทความฉบับนี้ได้พัฒนาเป็นเวอร์ชั่น 2015 ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยในเวอร์ชั่นนี้มุ่งพัฒนาให้สามารถค้นหารูปทรงโครงข้อหมุนที่หลากหลายยิ่งขึ้น โดยใช้หลักการของระเบียบวิธีจำกัด เพื่อวิเคราะห์หาแรงภายในชิ้นส่วนแต่ละชิ้น แล้วจึงออกแบบชิ้นส่วนให้สามารถรับแรงภายในได้ตามข้อกำหนดและเงื่อนไขการออกแบบโดยใช้วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD) ตามมาตรฐานของ AISC โดยจัดแบ่งกลุ่มชิ้นส่วนตามลักษณะที่นิยมใช้ในงานจริง



รูปที่ 2 ตัวอย่างแสดงหน้าจอหลักของโปรแกรม SSTAAD เวอร์ชั่น 2015

การจัดแบ่งกลุ่มชิ้นส่วนที่รับแรง ออกเป็น 4 กลุ่ม คือ ชิ้นส่วนคอร์ดบน-ล่าง (UC__LC), ชิ้นส่วนแนวตั้ง (VertM), ชิ้นส่วนแนวทแยง (DiagM) และชิ้นส่วนบริเวณจุดรองรับ (SuppT) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การจัดแบ่งกลุ่มชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนในโปรแกรม SSTAAD

3.1 สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายคือ น้ำหนักของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กต่อความยาวของชายคาที่เบาที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (1a)

$$f(x) = W_{UC_LC} + W_{DiagM} + W_{VertM} + W_{SuppT} \quad \textbf{(1a)}$$

$$W_{UC_LC} = \sum_i^u m_i L_i \quad \textbf{(1b)}$$

$$W_{DiagM} = \sum_i^d m_i L_i \quad \textbf{(1c)}$$

$$W_{VertM} = \sum_i^v m_i L_i \quad \textbf{(1d)}$$

$$W_{SuppT} = \sum_i^s m_i L_i \quad \textbf{(1e)}$$

โดยที่

$W_{UC_LC}, W_{DiagM}, W_{VertM}, W_{SuppT}$ คือ น้ำหนักของกลุ่มชิ้นส่วนคอร์ดบน-ล่าง, กลุ่มชิ้นส่วนแนวทแยง, กลุ่มชิ้นส่วนแนวตั้ง และกลุ่มชิ้นส่วนบริเวณจุดรองรับ ตามลำดับ

m_i คือ น้ำหนักต่อความยาวของชิ้นส่วนชิ้นที่ 1,2,3,..., (u หรือ d หรือ v หรือ s)

L_i คือ ความยาวของชิ้นส่วนชิ้นที่ 1,2,3,..., (u หรือ d หรือ v หรือ s)

u คือ จำนวนชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนกลุ่มคอร์ดบน-คอร์ดล่าง (Upper chord & bottom chord)

d คือ จำนวนชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนกลุ่มชิ้นส่วนแนวทแยง (Diagonal web)

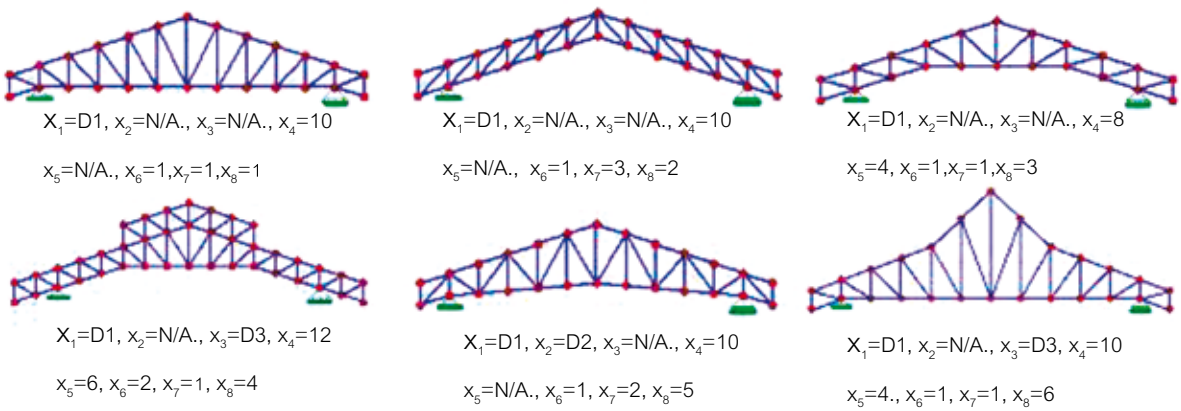
v คือ จำนวนชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนกลุ่มชิ้นส่วนแนวตั้ง (Vertical web)

s คือ จำนวนชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนกลุ่มชิ้นส่วนบริเวณจุดรองรับ

โดยมีตัวแปรออกแบบที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 1 และความหมายของตัวแปรออกแบบ x_1 ถึง x_8 เพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมสามารถแสดงเป็นรูปของโครงข้อหมุน ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 ตัวแปรออกแบบ

ตัวแปร	ความหมาย (สัญลักษณ์)	ช่วงของการค้นหาคำตอบ (ค่าที่เพิ่ม)	หน่วย
X_1	ความลึกของโครงข้อหมุน (D1)	0.30 - 3.00 (0.05)	m.
X_2	ความลึกของโครงข้อหมุนที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรูปทรงที่ 5 (D2)	0.30 - 3.00 (0.05)	m.
X_3	ความลึกของหลังคาชั้นที่สองของหลังคารูปทรงที่ 4 และรูปทรงที่ 6 (D3)	0.50 - 2.00 (0.05)	m.
X_4	จำนวนช่องในช่วงระยะห่างระหว่างเสา (N-panel)	8 - 40 (2)	odd
X_5	จำนวนช่องในช่วงกลางของหลังคารูปทรงที่ 3, 4 และ 6 (M)	2 - 20 (2)	odd
X_6	จำนวนช่องในแนวชายคาของโครงหลังคา (CTL)	1-2 (1)	integer
X_7	รูปแบบการถัก (Pratt, Warren, Howe)	1-3 (1)	Integer
X_8	รูปทรงของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสม	1-6 (1)	Integer



รูปที่ 4 ตัวอย่างของตัวแปรออกแบบ

3.2 การตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบ

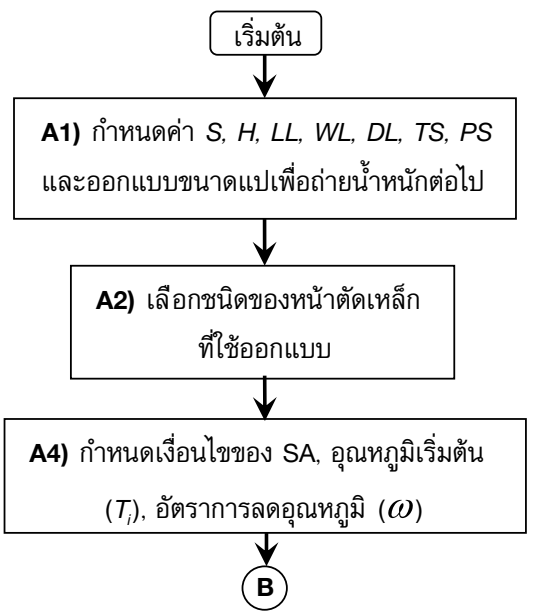
การตรวจสอบเงื่อนไขของการออกแบบ เป็นไปตามสมการเงื่อนไขไร้เชิงเส้นจำนวน 13 สมการ $\{g_1(x),g_2(x),g_3(x),....,g_{13}(x)\}$ ประกอบไปด้วย เงื่อนไขด้านเสถียรภาพและลักษณะการใช้งานของโครงข้อหมุน เงื่อนไขด้านกำลังวัสดุซึ่งจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบของวิธี ASD และนอกจากนี้แล้วยังมีข้อกำหนดตามเงื่อนไขทางด้านเรขาคณิตของรูปทรงโครงข้อหมุนแบบต่างๆ ทั้ง 6 รูปทรง และการกำหนดเงื่อนไขเพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการทำงานเชื่อมโครงข้อหมุน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมการเงื่อนไข

สมการเงื่อนไข	ความหมาย	หมายเหตุ
$g_1(x)$	อัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนกลุ่ม UC_LC ไม่เกิน 200	เงื่อนไขด้านเสถียรภาพของชิ้นส่วนและลักษณะการใช้งาน
$g_2(x)$	อัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนกลุ่ม DiagM ไม่เกิน 200	
$g_3(x)$	อัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนกลุ่ม VertM ไม่เกิน 200	
$g_4(x)$	อัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนกลุ่ม SuppTไม่เกิน 200	
$g_5(x)$	ระยะแอ่นตัวสูงสุดของจุดต่อภายในช่วงเสาต้องไม่เกิน L/360	
$g_6(x)$	ระยะแอ่นตัวสูงสุดของจุดต่อบริเวณชายคาต้องไม่เกิน L/180	
$g_7(x)$	หน่วยแรงในชิ้นส่วนกลุ่ม UC_LC จะต้องไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้	เงื่อนไขด้านกำลังวัสดุ
$g_8(x)$	หน่วยแรงในชิ้นส่วนกลุ่ม DiagM จะต้องไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้	
$g_9(x)$	หน่วยแรงในชิ้นส่วนกลุ่ม VertM จะต้องไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้	
$g_{10}(x)$	หน่วยแรงในชิ้นส่วนกลุ่ม SuppT จะต้องไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้	
$g_{11}(x)$	ความลึกของโครงข้อหมุน (D1) ไม่น้อยกว่า 0.20 เมตร	เงื่อนไขด้านเรขาคณิตและความเหมาะสมในการทำงาน
$g_{12}(x)$	ความสูงของโครงหลังคาชั้นสอง (D3) ไม่น้อยกว่า 0.50 เมตร	
$g_{13}(x)$	ขนาดของชิ้นส่วนคอร์ดบน-คอร์ดล่างมีขนาดไม่เล็กกว่าชิ้นส่วนอื่น	

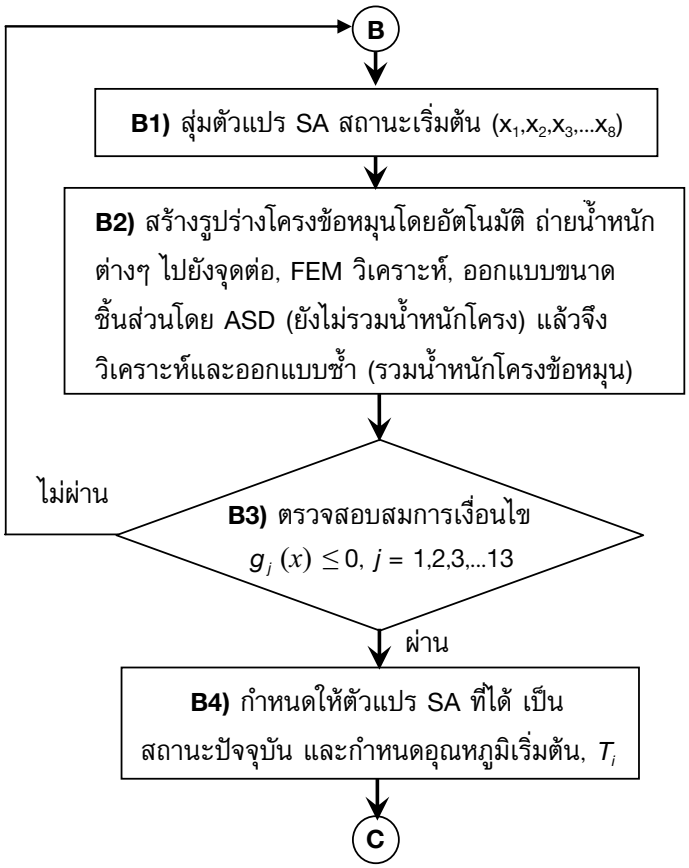
4. การพัฒนาโปรแกรม SSTAAD เพื่อวิเคราะห์หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

โปรแกรม SSTAAD ในเวอร์ชั่น 2015 ได้พัฒนาให้สามารถค้นหาขนาดของโครงข้อหมุนหลังคารูปทรงต่างๆ ได้มากขึ้นกว่า 10 รูปทรง เพื่อให้ครอบคลุมกับรูปทรงของโครงหลังคาโดยส่วนใหญ่ที่สถาปนิกหรือวิศวกรนิยมใช้ในการออกแบบ แต่อย่างไรก็ตามในบทความฉบับนี้ เลือกใช้รูปทรงของโครงข้อหมุนเพียง 6 รูปทรงที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เพื่อจะได้เป็นแนวทางให้กับสถาปนิกหรือวิศวกรในการกำหนดรูปทรงของโครงข้อหมุนและรูปแบบการถักให้มีความเหมาะสม เพื่อให้สามารถออกแบบได้โครงข้อหมุนที่มีน้ำหนักเบาที่สุดหรือใกล้เคียง การกำหนดค่าให้กับโปรแกรม SSTAAD โดยเริ่มต้นจากการรับค่าต่างๆ จากผู้ใช้งานโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 5 หรือถ้าหากผู้ใช้งานโปรแกรมไม่กำหนดค่าต่างๆ ให้ โปรแกรมจะทำการกำหนดค่าเบื้องต้น (Default) ให้โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 5 ขั้นตอนการกำหนดค่าโปรแกรม SSTAAD

การออกแบบที่เหมาะสมเริ่มต้นจากการสุ่มคำตอบที่อาจเป็นไปได้จากตัวแปรออกแบบ ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่กำหนด หลังจากนั้น ให้ตรวจสอบตามสมการเงื่อนไข ถ้าผ่านตามสมการเงื่อนไขทั้ง 13 สมการ อัลกอริทึมจะกำหนดให้เป็นสถานะปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการสร้างคำตอบเริ่มต้นให้กับอัลกอริทึม SA

หลังจากนั้นจะเป็นไปตามขั้นตอนของอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว (SA) เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด ตามสมการที่ (2) และ (3) ซึ่งเป็นระบบสมการไร้เชิงเส้น โดยที่อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว เป็นไปตามขั้นตอนที่ C1 ถึง C8 ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีสมการในการค้นหาโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสม ดังนี้

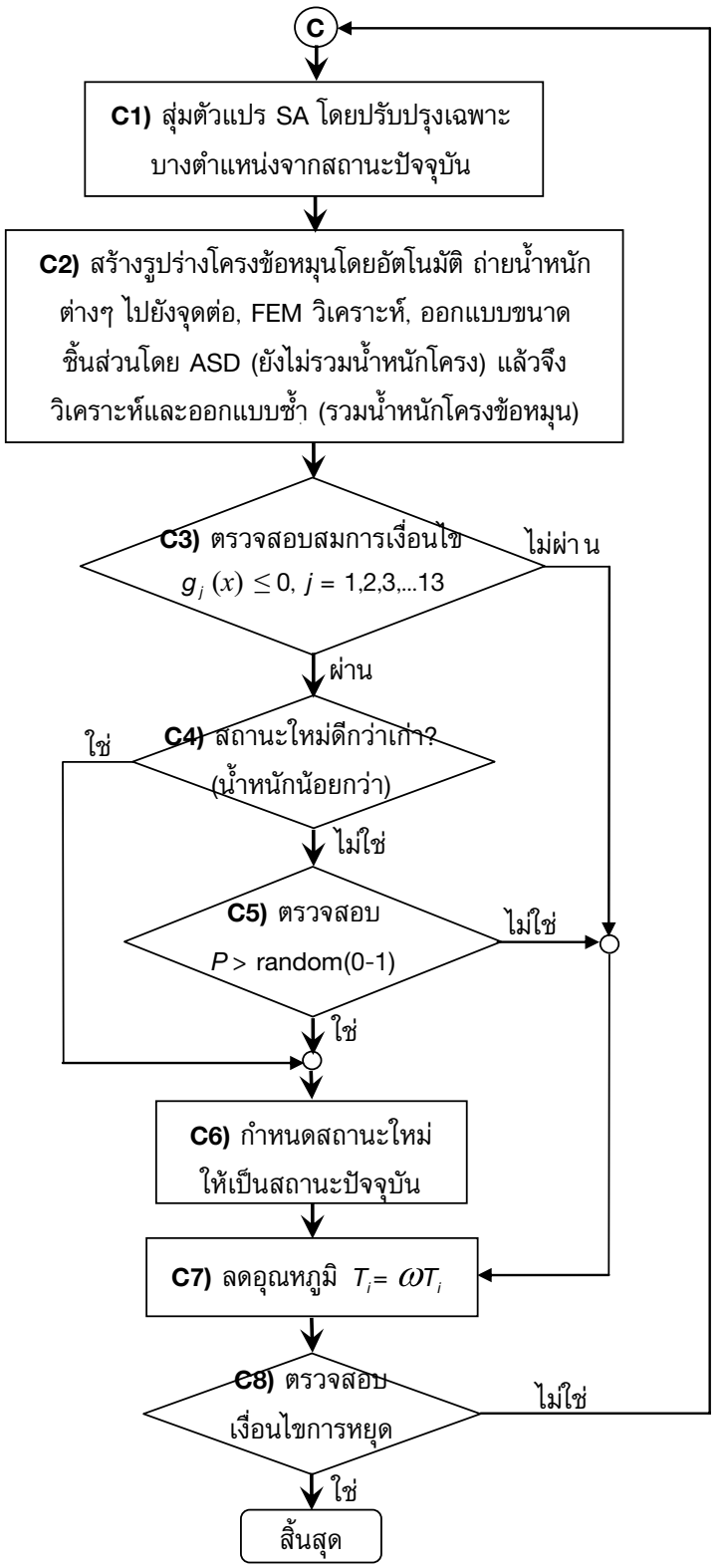
$$w = minimize \frac{f(x)}{TL} \quad \textbf{(2)}$$

$$g_j(x) \le 0, j = 1,2,3,...13 \quad \textbf{(3)}$$

โดยที่

w คือ น้ำหนักที่เบาที่สุดของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กต่อความยาวในแนวราบของโครงข้อหมุน

TL คือ ความยาวของปลายซายคาถึงอีกปลายในแนวราบ (เมตร)



รูปที่ 7 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว

ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นและเงื่อนไขการหยุดของอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียวจะเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้อัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบได้เร็วหรือช้า

5. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

5.1 รูปทรงโครงข้อหมุนที่เหมาะสม

ผลการทดสอบตัวอย่างโครงข้อหมุนทั้ง 190 ตัวอย่าง พบว่า รูปทรงของโครงข้อหมุนที่เหมาะสมมากที่สุด 3 รูปทรงแรก ได้แก่ รูปทรงแบบ Scissor, Girder และ Trapezoid เท่ากับ ร้อยละ 67.9, 13.2 และ 11.6 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความถี่ของรูปทรงโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่มีน้ำหนักเบาที่สุด

ระยะห่างช่วงเสา (เมตร)	ความลาดชันหลังคา (องศา)	ความถี่ของรูปทรงโครงข้อหมุนที่เหมาะสม					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
10	5 - 40	5	0	1	0	32	2
15	5 - 35	1	0	2	0	30	2
20	5 - 30	4	0	0	0	26	0
25	5 - 25	3	0	3	0	17	2
30	5 - 20	8	0	2	0	10	0
35	5 - 20	2	0	7	0	10	1
40	5 - 20	2	4	7	0	4	3
	รวม(ครั้ง)	25	4	22	0	129	10
	ร้อยละ	**13.2**	**2.1**	**11.6**	**0.0**	**67.9**	**5.3**

หมายเหตุ

1 = Girder, 2 = Parallel chord, 3 = Trapezoid, 4 = Top Hat, 5 = Scissor, 6 = Polynesian

จากผลการทดสอบที่พบ จะเห็นได้ว่า รูปทรงที่เหมาะสมในทุกๆ ความลาดชันของหลังคาได้แก่รูปทรงกรรไกร (Scissor) ที่มีความลึกของโครงข้อหมุนในตำแหน่ง D2 มากกว่าความลึก D1 ทั้งนี้เนื่องจากโครงข้อหมุนในกรณีศึกษาที่เลือกใช้เป็นแบบช่วงเดียว บริเวณช่วงกลางของโครงข้อหมุนเกิดแรงภายในชิ้นส่วนคอร์ดบน-คอร์ดล่างสูง ทำให้จำเป็นต้องใช้ความลึกในบริเวณช่วงกลางมากกว่าบริเวณจุดรองรับ ในขณะที่รูปทรงที่ได้รับความนิยมในการออกแบบของสถาปนิกหรือวิศวกรคือรูปทรงคอร์ดบน-ล่างขนานกัน (Parallel chord) กลับพบว่าไม่ใช่โครงข้อหมุนที่มีน้ำหนักเบาที่สุด และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรณีของโครงข้อหมุนแบบมีหลังคาซ้อนกัน 2 ระดับอย่างเช่น โครง Top hat พบว่า อัลกอริทึมไม่สามารถค้นพบได้สักครั้งว่าเป็นโครงข้อหมุนที่มีน้ำหนักเบาที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากโครงข้อหมุนดังกล่าวมีโครงเหล็กซ้อนทับอีกชั้นเพื่อทำเป็นโครงสร้างของหลังคาชั้นบนสุด ส่งผลให้น้ำหนักของโครงข้อหมุนรูปทรงนี้มีน้ำหนักมากกว่าโครงข้อหมุนรูปทรงอื่นๆ ทุกโครง แต่อย่างไรก็ตาม บ่อยครั้งที่พบเห็นโครงข้อหมุนรูปทรงนี้ใช้เป็นโครงหลังคาของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการก่อสร้างให้มีหลังคาสองชั้น ช่วยให้สามารถติดตั้งเกล็ดเพื่อระบายความร้อนที่อยู่ใต้หลังคา นอกจากนี้แล้ว สถาปนิกหรือวิศวกรยังนิยมออกแบบรูปทรงนี้ เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีความสวยงาม ถึงแม้ว่าค่าก่อสร้างจะแพงกว่ารูปทรงอื่นก็ตาม

แต่อย่างไรก็ตาม จากรายงานการวิจัยจะพบว่ารูปทรงโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กทรงกรรไกรเป็นรูปทรงที่มีน้ำหนักเบาที่สุด แต่กลับพบว่าโครงข้อหมุนรูปทรงนี้กลับไม่ค่อยได้รับความนิยมในการออกแบบและก่อสร้าง

เท่ากับรูปทรงคอร์ดบน-ล่างขนานกัน ทั้งนี้ เนื่องจากว่าในการก่อสร้างโครงข้อหมุนรูปทรงคอร์ดบน-ล่างขนานกันมีความง่ายในการทำงานตัดและเชื่อมมากกว่าโครงข้อหมุนทรงกรรไกร

5.2 รูปแบบการถักที่เหมาะสมของโครงข้อหมุน

ผลการทดสอบพบว่า รูปแบบการถักของโครงข้อหมุนที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ การถักแบบ Pratt, Warren และ Howe เท่ากับ ร้อยละ 74.2, 24.2 และ 1.6 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความถี่ของรูปแบบการถักของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่มีน้ำหนักเบาที่สุด

ระยะห่างช่วงเสา (เมตร)	ความลาดชันหลังคา (องศา)	ความถี่ของรูปแบบการถัก		
		Pratt	Warren	Howe
10	5 - 40	32	7	1
15	5 - 35	29	6	0
20	5 - 30	24	6	0
25	5 - 25	15	9	1
30	5 - 20	13	7	0
35	5 - 20	12	7	1
40	5 - 20	16	4	0
	รวม(ครั้ง)	141	46	3
	ร้อยละ	**74.2**	**24.2**	**1.6**

รูปแบบการถักของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กแบบแพรท (Pratt) เป็นรูปแบบการถักที่ทำให้ได้น้ำหนักโครงข้อหมุนที่น้ำหนักเบาที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกันกับรูปแบบที่สถาปนิกหรือวิศวกรส่วนใหญ่เลือกใช้ แต่อย่างไรก็ตาม รูปแบบของการถักมีผลกับน้ำหนักของโครงข้อหมุนที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณ 1-6 เปอร์เซ็นต์)

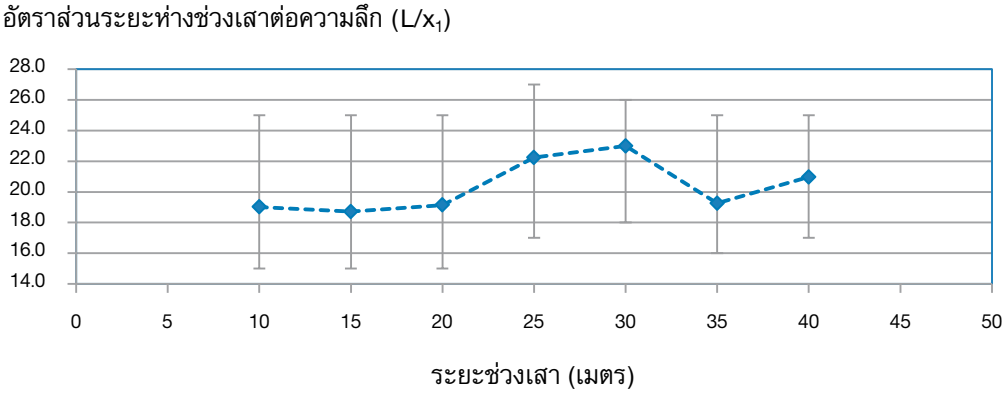
5.3 อัตราส่วนของระยะห่างช่วงเสาต่อความลึก (L/x_t) ที่เหมาะสมของโครงข้อหมุน

จากผลการทดสอบจำนวน 190 ตัวอย่างของโครงข้อหมุนที่ระยะห่างช่วงเสาและความลาดชันของหลังคาที่แตกต่างกัน ได้ความลึกค่าเฉลี่ย, ค่าต่ำสุด, ค่าสูงสุด และน้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบโปรแกรม SSTAAD เพื่อค้นหาโครงข้อหมุนที่มีน้ำหนักเบาที่สุด

ระยะห่างช่วงเสา (เมตร)	ความลาดชันหลังคา (องศา)	ความลึกของโครงข้อหมุน (ม.)			น้ำหนักโครงข้อหมุน (กก./ม.)
		ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	
10	5.0-40.0	0.40	0.53	0.65	9.81-14.33 ($\overline{\overline{W}}$ = 11.41)
	L/x_1	15.0	19.0	25.0	
15	5.0-35.0	0.60	0.80	0.95	14.66-19.81 ($\overline{\overline{W}}$ = 16.92)
	L/x_1	15.0	18.7	25.0	
20	5.0-30.0	0.80	1.05	1.30	19.49-25.54 ($\overline{\overline{W}}$ = 21.47)
	L/x_1	15.0	19.1	25.0	
25	5.0-25.0	0.90	1.12	1.40	25.58-32.35 ($\overline{\overline{W}}$ = 29.01)
	L/x_1	17.0	22.2	27.0	
30	5.0-20.0	1.15	1.31	1.60	30.99-40.25 ($\overline{\overline{W}}$ = 35.53)
	L/x_1	18.0	23.0	26.0	
35	5.0-20.0	1.40	1.82	2.10	38.78-45.53 ($\overline{\overline{W}}$ = 42.04)
	L/x_1	16.0	19.3	25.0	
40	5.0-20.0	1.55	1.91	2.25	43.54-63.37 ($\overline{\overline{W}}$ = 52.32)
	L/x_1	17.0	21.0	25.0	

ผลการทดสอบ พบว่า อัตราส่วนของระยะห่างช่วงเสาต่อความลึกที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนที่ทำให้โครงข้อหมุนหลังคาเหล็กมีน้ำหนักเบาที่สุด มีค่าอยู่ระหว่าง 15.0 ถึง 27.0 ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Chetchotisak [4] ที่พบว่าอัตราส่วนของระยะห่างช่วงเสาต่อความลึกที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนหลังคามีค่าประมาณ 17.34

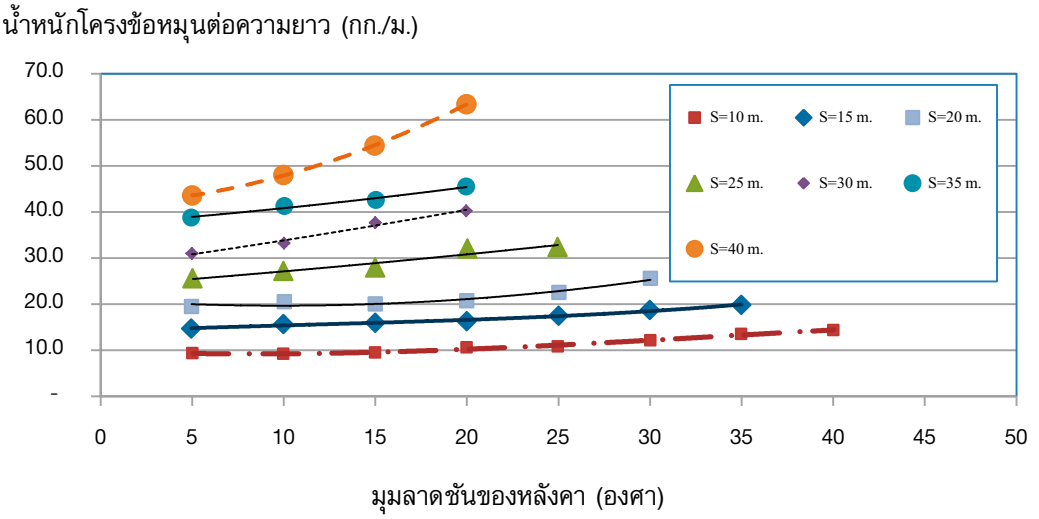


รูปที่ 8 อัตราส่วนระยะห่างช่วงเสาต่อความลึกที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนที่มีน้ำหนักเบาที่สุด

ดังนั้น ในโปรแกรม SSTAAD เวอร์ชั่น 2015 จะเลือกใช้ค่าอัตราส่วนระยะห่างช่วงเสาต่อความลึก ระหว่าง 17 ถึง 25 ($17 \leq \frac{L}{x_1} \leq 25$) ดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อเป็นขอบเขตในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงข้อหมุนมีน้ำหนักเบา เพื่อให้โปรแกรมสามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดได้เร็วขึ้น

5.4 น้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่มุมลาดชันแตกต่างกัน

จากผลการทดสอบที่ได้ เมื่อนำค่าน้ำหนักเฉลี่ยของโครงข้อหมุนและมุมลาดชันของหลังคาไปเขียนกราฟ โดยให้ มุมลาดชันของหลังคา (หน่วย : องศา) เป็นแกนนอน และค่าเฉลี่ยน้ำหนักของโครงข้อหมุนที่เหมาะสมที่สุด (หน่วย : กิโลกรัม/เมตร) เป็นแกนตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 9

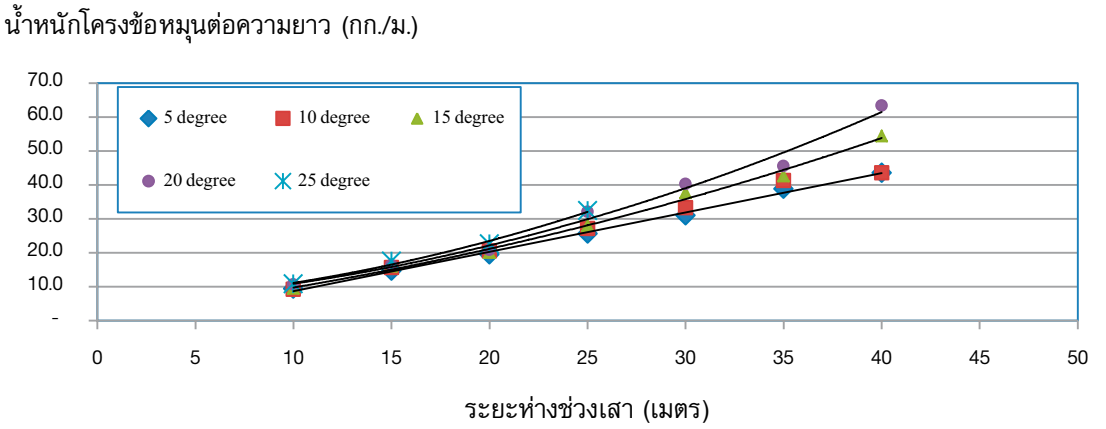


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมลาดชันของหลังคากับน้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุน ซึ่งมีระยะห่างช่วงเสาที่แตกต่างกัน

พบว่า เมื่อมุมลาดชันของหลังคาเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักต่อความยาว 1 เมตรที่เบาที่สุดของโครงข้อหมุนจะเพิ่มมากขึ้นตามอย่างไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะห่างช่วงเสามากขึ้น พบว่ามีแนวโน้มที่น้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าระยะห่างช่วงเสาที่มีค่าน้อย และจากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีระยะห่างช่วงเสามากขึ้น รูปทรงโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสมมีการกระจายความถี่ไปยังรูปทรงอื่น ซึ่งไม่ใช่รูปทรงทรงกรรไกรเพียงอย่างเดียว ทำให้น้ำหนักเฉลี่ยของโครงข้อหมุนเพิ่มขึ้น

5.5 น้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่ระยะห่างช่วงเสาแตกต่างกัน

จากผลการทดสอบที่ได้ เมื่อนำค่าน้ำหนักเฉลี่ยของโครงข้อหมุนและระยะห่างช่วงเสาไปเขียนกราฟ โดยให้ระยะห่างช่วงเสา (หน่วย : เมตร) เป็นแกนนอน และค่าเฉลี่ยน้ำหนักของโครงข้อหมุนที่เหมาะสม (หน่วย : กิโลกรัม/เมตร) เป็นแกนตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างช่วงเสากับน้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุน ซึ่งมีมุมลาดชันของหลังคาที่แตกต่างกัน

พบว่า เมื่อระยะห่างช่วงเสามากขึ้น น้ำหนักต่อความยาว 1 เมตรของโครงข้อหมุนเบาที่สุดจะเพิ่มมากขึ้นตามอย่างไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมุมลาดชันของหลังคาสูงขึ้น พบว่ามีแนวโน้มที่น้ำหนักจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้นมากยิ่งขึ้นกว่าโครงหลังคาที่มุมลาดชันต่ำ และจากกราฟข้างต้น เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างช่วงเสาเท่ากับ 40 เมตร เมื่อมุมลาดชันของหลังคาเพิ่มขึ้นจากมุมลาดชัน 10 องศา เป็นมุมลาดชัน 20 องศา น้ำหนักที่เบาที่สุดของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 45 นั่นย่อมแสดงให้เห็นว่า มุมลาดชันของหลังคามีผลต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสม

6. บทสรุป

โปรแกรม SSTAAD ในเวอร์ชั่น 2015 ได้รับการพัฒนาให้โปรแกรมสามารถค้นหารูปทรงที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่หลากหลายยิ่งขึ้น โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกรูปทรงโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กได้มากกว่า 10 รูปทรง (แต่ในบทความฉบับนี้ นำเสนอเพียง 6 รูปทรงที่มีรูปทรงหลังคาที่คล้ายคลึงกันเท่านั้น) จากผลการทดสอบโปรแกรม เมื่อใช้อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียวเพื่อค้นหารูปทรงและขนาดของโครงข้อหมุนที่เหมาะสมจากจำนวนตัวอย่างโครงข้อหมุนหลังคาที่ทดสอบจำนวน 190 ตัวอย่าง ซึ่งแปรผันตามระยะห่างช่วงเสาและความลาดชันของหลังคา พบว่า

1. รูปทรงโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสมมากที่สุด ได้แก่ รูปทรงแบบ Scissor, Girder และ Trapezoid เท่ากับ ร้อยละ 67.9, 13.2 และ 11.6 ตามลำดับ

2. รูปแบบการถักที่เหมาะสมมากที่สุด ได้แก่ การถักแบบ Pratt, Warren และ Howe เท่ากับ ร้อยละ 74.2, 24.2 และ 1.6 ตามลำดับ

3. อัตราส่วนระยะห่างช่วงเสาต่อความลึก (L/x_1) ของโครงข้อหมุนที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 17 ถึง 25

4. น้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นตามมุมลาดชันของหลังคาที่สูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น

5. น้ำหนักต่อความยาวของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างช่วงเสาที่มากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น

แต่อย่างไรก็ตาม ผลสรุปที่ได้ดังกล่าวข้างต้นเป็นผลสรุปเฉพาะของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กแบบช่วงเดียวที่มีจุดรองรับปลายด้านหนึ่งเป็นแบบเคลื่อนที่ได้เท่านั้น การวิจัยและพัฒนาโปรแกรม SSTAAD เพื่อเพิ่มความสามารถในการค้นหารูปทรงที่เหมาะสมของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่มีเสารับตรงกลางช่วง (โครงข้อหมุนแบบสองช่วง) หรือโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กที่มีปลายทั้งสองข้างเป็นฐานรองรับแบบยึดหมุน เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นข้อแตกต่างกับรายงานฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ให้กับสถาปนิกและวิศวกรในการพิจารณาเลือกใช้ลักษณะโครงข้อหมุนให้เหมาะสมกับงานที่หลากหลายประเภทยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ศึกษาอนุภูมิภาคลุ่มน้ำโขง มหาวิทยาลัยนครพนม (Greater Mekhong Subregion Study Center, GMSC-NPU) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

1. Tapown, A., Wongpa, J., Lamom, A. and Cheerarot, R., 2012, “Optimum Design of Reinforced Concrete Biaxial Rectangular Column using Simulated Annealing Algorithm,” *KMUTT Research & Development Journal*, 35 (2), pp. 173-185. (In Thai)

2. Wongsa-nga, S., Tapown, A., Cheerarot, R. and Lamom, A., 2013, “An application of Hill Climbing Algorithm for Optimal Ratio of Ground Bottom Ash in Concrete,” *KMUTT Research & Development Journal*, 36 (1), pp. 33-50. (In Thai)

3. Jiravacharadej, M., 2005, “Optimal Height for Steel Roof Truss Design,” *Suranaree Journal of Science and Technology*, 7 (2), pp. 149-153. (In Thai)

4. Chetchotisak, P., 2011, “Optimal Design and Sensitivity Analysis of Roof Truss,” *KKU Engineering journal*, 38 (1), pp. 1-10. (In Thai)

5. Gil, L. and Andreu, A., 2001, “Shape and Cross-section Optimisation of a Truss Structure,” *Journal of Computers and Structures*, 79, pp. 681-689.

6. Maneekul, P. and Thepputhangkoon, P., 2014, “A Development of Structural Steel Truss Automatic Analysis and Design Program : Minimized Truss Weight of Arch Truss by Simulated Annealing Algorithm,” *Proceeding of 19th National Convention of Civil Engineering*, Khon Kaen, Thailand, pp. 475-483. (In Thai)

7. Pyl, L., Sitters, C.W.M. and De Wilde, W.P., 2013, “Design and Optimization of Roof Trusses using Morphological Indicators,” *Journal of Advances in Engineering Software*, 62-63, pp. 9-19.

8. Lamberti, L., 2008, “An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Design Optimization of Truss Structures,” *Journal of Computers and Structures*, 86, pp. 1936-1953.

9. Hasancebi, O. and Erbatur, F., 2002, “Layout Optimization of Trusses using Simulated Annealing,” *Journal of Advances in Engineering Software*, 33, pp. 681-696.

10. Hamza, K., Mahmoud, H. and Saitou, K., 2003, “Design and Optimization of N-shaped Roof Trusses using Reactive Taboo Search,” *Journal of Applied Soft and Computing*, 3, pp. 221-235.