

การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารที่อยู่อาศัยขนาดเล็กด้วยการก่อสร้างแบบพับได้

The Structural Design Optimization for Small Residential Buildings Constructed by Foldable Method

พชร อมรสิทธิพัฒน์¹ พรณัฐชยา ไม้่ออรุณรัตน์² สมพงษ์ รุ่งสว่าง³ และ รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งจรรยาวงศ์⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

*Corresponding author; E-mail address: pochara.a@gmail.com

**Corresponding author; E-mail address: was203040@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบอาคารที่อยู่อาศัยขนาดเล็กแบบพับได้ในเขตร้อนชื้น ด้วยหลักการออกแบบชิ้นส่วนทางกล ร่วมกับหลักการออกแบบชิ้นส่วนโครงถักที่เหมาะสมที่สุดโดยระเบียบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) ผลลัพธ์ของการศึกษานี้ให้แบบบ้านแฝดหลังคาจั่ว ที่สามารถพับเก็บใส่รถบรรทุกทุกขนาดมาตรฐานได้ และมีน้ำหนักในส่วนโครงถักที่เบาที่สุด

คำสำคัญ: เขตร้อนชื้น, โครงสร้างอาคารพับได้, การออกแบบชิ้นส่วนโครงถักที่เหมาะสมที่สุด, ระเบียบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม

Abstract

This article presents the design of small foldable residential buildings in tropical climate by utilizing the machinery principles along with the Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) Algorithm to determine the optimal selection of truss member section. The research resulted in the design of a semi-detached gable house which can be folded and transported by the standard truck with the lightest truss weight.

Keywords: Tropical Climate, Foldable Building Structures, Optimal Truss Member Design, Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

บทความนี้ ได้รับแรงบันดาลใจมาจาก โครงการวิจัยนวัตกรรมกรสร้างบ้านที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพของการเคหะแห่งชาติ เพื่อแก้ไขปัญหาความเดือดร้อนด้านที่อยู่อาศัยของประชาชน โดยการเคหะแห่งชาติได้ดำเนินการตามหลักแนวคิด 6 GREEN NHA

คณะผู้วิจัยตระหนักถึงความสำคัญของข้อเสนอดังกล่าว และมีความเชื่อว่าระบบพิกัดแผ่นผนังโมดูลแบบพับได้ ร่วมกับหลักการออกแบบชิ้นส่วน

โครงถักที่ปลอดภัยและเหมาะสมที่สุดโดยระเบียบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) [3] จะช่วยตอบโจทย์แนวความคิดของการเคหะแห่งชาติได้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในประเด็นของการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างการก่อสร้างและการขนส่ง การลดระยะเวลาดำเนินการ และการลดปริมาณวัสดุและแรงงานในการก่อสร้างอาคาร

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการก่อสร้างที่อยู่อาศัยขนาดเล็กแบบพับได้ที่เหมาะสมกับผู้มีรายได้น้อย
2. เพื่อออกแบบที่อยู่อาศัยขนาดเล็กที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและผู้อยู่อาศัย และเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น
3. เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัยพร้อมอยู่แบบสำเร็จรูป ที่ประหยัดเวลาและแรงงานในการติดตั้ง และสามารถพับเก็บเพื่อขนส่งไปใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ ตามความต้องการของการเคหะแห่งชาติ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบโครงสร้างพับได้ ที่สามารถขนส่งได้ด้วยรถบรรทุกทั่วไปอย่างถูกต้องตามกฎหมาย โดยอ้างอิงการจัดสรรพื้นที่ใช้สอยตามแบบสถาปัตยกรรม โครงการบ้านเช่าสำหรับผู้มีรายได้น้อย แบบ C ของการเคหะแห่งชาติ โดยปรับเปลี่ยนบางส่วนเพื่อสร้างสภาวะน่าสบาย และลดการใช้พลังงาน ตามแนวความคิด Passive Design จัดทำระเบียบวิธีการออกแบบอย่างเป็นระบบ
2. ดำเนินการวิจัยภายใต้สมมุติฐานที่ว่า งานเตรียมพื้นที่หน้างาน และก่อสร้างฐานรากเสร็จสิ้นเรียบร้อยก่อนการติดตั้งที่พักอาศัย
3. น้ำหนักบรรทุกและข้อกำหนดการออกแบบที่ที่พักอาศัยในโครงการวิจัยอ้างอิงมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย กฎกระทรวงฉบับที่ 6 และ มาตรฐานสากลอื่นที่เกี่ยวข้อง
4. ออกแบบชิ้นส่วนโครงถักด้วยระเบียบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) เพื่อให้ได้รูปแบบหน้าตัดของโครงสร้างที่เบาและปลอดภัยที่สุด โดยพิจารณาผลที่ได้ร่วมกับโปรแกรม SAP2000
5. ออกแบบระบบโครงสร้างพื้น และหลังคาด้วยโปรแกรม SAP2000

6. เสนอวัสดุก่อสร้างเหมาะสมกับโครงสร้างระบบพิกัดแผนผังโมดูลแบบพับได้ ทั้งในเชิงความปลอดภัย และน้ำหนักวัสดุ
7. จัดทำแบบ และบัญชีประเมินราคา

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

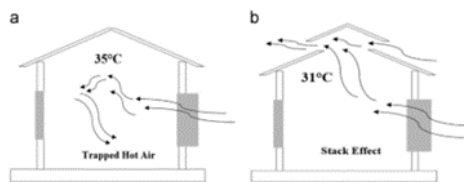
2.1 สถาปัตยกรรมเขตร้อน

ออกแบบสถาปัตยกรรมเขตร้อน ตามแนวความคิดของอาคารเขียว นั้นคือการออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อช่วยให้อาคารสามารถใช้ประโยชน์จากสถานะแวดล้อมธรรมชาติด้วยวิธี Passive อย่างเต็มที่ และวิธีแบบ Active เท่าที่จำเป็น (Behling S., 1970) ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงาน และสร้างสภาวะน่าสบายแก่ผู้อยู่อาศัยอันประกอบไปด้วยปัจจัย 6 ประการ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่พื้นผิว ความเร็วลม เสื้อผ้าที่สวมใส่ และกิจกรรมของผู้ใช้ (P.O. Fanger, 1970) ดังนั้นจะต้องออกแบบโดยคำนึงถึงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย โดยใช้ปัจจัยต่าง ๆ ข้างต้นเป็นตัวชี้วัด

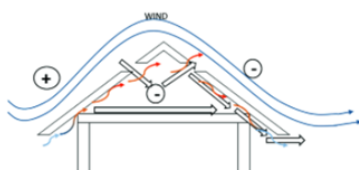
ในด้านการออกแบบโครงสร้าง จะนำไปสู่การพัฒนาหลังคาเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร การทำหลังคาจั่วจะทำให้อีกฝั่งหนึ่งของหลังคาเกิดร่มเงาเมื่อแดดเปลี่ยนทิศ และหลังคาที่ทำมุมเอียง 30 องศาขึ้นไปควบคู่กับการทำช่องระบายอากาศตั้งแต่ 20 มิลลิเมตรขึ้นไปจะพัฒนาการไหลเวียนของอากาศใต้หลังคา และลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกอาคารได้อย่างมีนัยสำคัญ (Tashoo et al., 2014)

โดยการหมุนเวียนของอากาศตามธรรมชาติมีสองประเภท ได้แก่ Stack Ventilation คือการหมุนเวียนอากาศอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 1 และ Driven Ventilation คือการหมุนเวียนของอากาศอันเนื่องมาจากแรงลม ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันความดันบวกด้านเหนือลมและความดันลบด้านใต้ลม ส่งผลให้อากาศร้อนจากกระบวนการ Stack Ventilation ถูกระบายออก ดังรูปที่ 2 (Q. Roslan et al., 2015)

ผลลัพธ์ของการไหลเวียนของอากาศที่ดีช่วยเพิ่มความเร็วลม และลดปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการแผ่รังสีจากวัสดุ ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในอาคารเฉลี่ยตลอดวันลดลง อันเป็นปัจจัยส่งเสริมความน่าสบายของผู้อยู่อาศัยตามนิยามข้างต้น



รูปที่ 1 Stack Ventilation



รูปที่ 2 Driven Ventilation

2.2 การออกแบบชิ้นส่วนทางกล

2.2.1 กลไกสี่ข้อต่อแบบมีจุดเปลี่ยน

กลไกสี่ข้อต่อ ประกอบด้วยข้อต่อ 4 ขึ้นมาต่อกันโดยจุดต่อเป็นคู่สัมผัสแบบหมุน ซึ่งกลไกสี่ข้อต่อที่จะนำมาใช้ประโยชน์ต่อไปในงานวิจัยฉบับนี้เป็นกลไกชนิดมีจุดเปลี่ยน ตามวิธีการจำแนกของกราชอฟ ดังรูปที่ 3 (เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของข้อต่อในกลไก มักกำหนดให้ข้อต่อชิ้นหนึ่งเป็นฐานเครื่อง นั่นคือจุดต่อสองจุดถูกยึดอยู่กับที่) โดยกลไกชนิดมีจุดเปลี่ยนจะมีเงื่อนไขดังสมการ (1)

$$s + l = p + q \quad (1)$$

กำหนดให้ s คือ ความยาวของข้อต่อที่สั้นที่สุด, l คือ ความยาวของข้อต่อที่ยาวที่สุด, p และ q คือ ความยาวของข้อต่อที่เหลือ

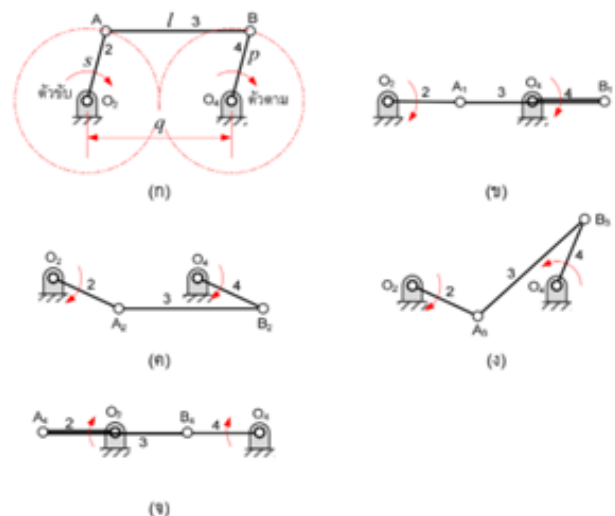
สามารถพิสูจน์ได้ว่า ข้อต่อกลไกที่มีจุดเปลี่ยนทุกชิ้นจะเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงเสมอ โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4 (ขวา) พบว่า กลไกใด ๆ จะพับและแนบเป็นเส้นตรงเดียวกันได้ ก็ต่อเมื่อ

$$l - p + s - q = 0$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการ (1) ตรงตามเงื่อนไขของกลไกที่มีจุดเปลี่ยน

2.2.2 การออกแบบจุดต่อ

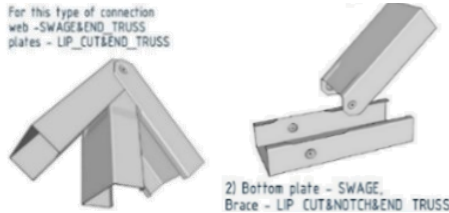
ในโครงสร้างที่ต้องการออกแบบ จุดต่อของโครงถักบางจุดจะมีพฤติกรรมเป็นจุดต่อที่เป็นข้อหมุน (ไม่รับโมเมนต์) ขณะพับหรือกำลังกางออก แต่เมื่อกางออกจนสุดพร้อมใช้งานแล้ว ต้องมีพฤติกรรมเป็นจุดต่อข้อแข็ง (ทนต่อโมเมนต์) จึงเลือกการทำจุดต่อด้วยการบากเนื้อเหล็กให้เข้ารูปกันได้และยึดรั้งกันไว้ด้วยสลักเกลียว ซึ่งระหว่างที่พับหรือกางออกสลักเกลียวจะทำหน้าที่เป็นข้อต่อแบบหมุน และเมื่อกางสุด เนื้อเหล็กที่ถูกบากจะขัดกันพอดี เป็นข้อแข็งได้ เรียกว่า Cut End Truss ดังรูปที่ 5



รูปที่ 3 กลไกมีจุดเปลี่ยน



รูปที่ 4 การพิสูจน์กลไกมีจุดเปลี่ยน



รูปที่ 5 Cut End Truss

(ที่มา: Framebuilder-MRD Light Gauge Steel Designer)

2.3 ทฤษฎีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม

2.3.1 ที่มาของการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคแบบครอบคลุม

ในการหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดเริ่มต้นจาก วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO แต่พบว่ามีข้อเสีย คือ มีการลู่เข้าคำตอบที่เร็วเกินไป (Premature Convergence) ซึ่งเป็นการตกหลุมคำตอบที่ยังไม่ได้ดีที่สุด (Local Optimum) วิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization, CLPSO) จึงถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว

2.3.2 การแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการเรียนรู้อนุภาคอย่างครอบคลุม

ในวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม อนุภาคจะสามารถเรียนรู้ตำแหน่งของอนุภาคอื่นในมิติปัญหาเดียวกัน ทำให้การหาค่าตำแหน่งของแต่ละอนุภาคมีความหลากหลายมากขึ้น ซึ่งตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาคจะถูกจัดเก็บแทนที่ค่าเดิม และนำไปหาค่าความเร็วต่อไปโดยคำนึงถึงค่าความเฉื่อยของอนุภาค แสดงดังรูปที่ 6

2.4 การตรวจสอบอัตราส่วนความเค้น

มีขั้นตอนการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 7 โดย F_d คือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ K คือสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล L คือความยาวของชิ้นส่วน r คือรัศมีจากระศูนย์กลางของเหล็กหน้าตัดต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส $\frac{KL}{r}$ คือ สัดส่วนความละเอียดของชิ้นส่วน ภายใต้แรงอัด และ C_c คือ ค่าสัดส่วนความละเอียด ณ ตำแหน่งที่พฤติกรรมเปลี่ยนจากอีลาสติกเป็นอินอีลาสติก

จากรูป เป็นการหาหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ ของหน้าตัดที่ถูกเลือกมา โดยตรวจสอบความละเอียด ($\frac{KL}{r}$) ว่าไม่เกินค่าสูงสุดที่กำหนด จากนั้นตรวจสอบว่าค่าความละเอียดที่ได้มีค่าในช่วงอินอีลาสติกหรืออินอีลาสติก แล้วจึงคำนวณค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ตามสมการในรูปที่ 7 เมื่อได้ค่าแรงอัดที่ยอมให้จึงสามารถนำไปตรวจสอบอัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio) กับแรงที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างได้ต่อไป

3. เปรียบวิธีการออกแบบ

3.1 การออกแบบขนาด สัดส่วน และรูปแบบการพับ

3.1.1 วัตถุประสงค์ เงื่อนไข และสมมติฐาน

วัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ ข้อต่อทุกข้อต่อในแผนภาพคิเนแมติกต้องสามารถพับเข้าหากันและเรียงตัวอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันได้ในจังหวะสุดท้ายเพื่อให้โครงสร้างหลังการพับเก็บที่บางที่สุด โดยไม่ละเมิดเงื่อนไขดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

เงื่อนไขแบบสถาปัตยกรรม กำหนดให้โครงถักขณะกางออกสุดมีหน้ากว้างเท่ากับที่กำหนดในแบบสถาปัตยกรรม และจะต้องรักษาความกว้างดังกล่าวตลอดความสูง 3 เมตรนับจากระดับคานพื้นในแผนภาพคิเนแมติกเพื่อการใช้สอยอย่างสะดวก

เงื่อนไขช่องเปิดเพื่อการสัญจร กำหนดให้โครงถักที่จะออกแบบนั้นต้องมีช่องเปิดที่อยู่ ณ บริเวณกึ่งกลาง โดยมีความกว้างไม่น้อยกว่า 1 เมตร และความสูงไม่น้อยกว่า 2 เมตร ขนาดดังกล่าวอ้างอิงมาจากขนาดประตูทั่วไป

เงื่อนไขข้อจำกัดด้านการขนบรรทุก กำหนดให้ไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของข้อต่อในแผนภาพคิเนแมติกสำหรับจังหวะพับสุด อยู่ต่ำกว่าระดับคานพื้นหรืออยู่สูงกว่าระดับสามเมตรนับจากระดับคานพื้น

เงื่อนไขของการออกแบบหลังคาจั่ว กำหนดให้ยอดหลังคาเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการ (2) ซึ่งจะทำให้หลังคามีความลาดเอียงเฉลี่ย 30 องศาเทียบกับแนวระดับ ด้วยเหตุผลจากงานวิจัยในหัวข้อ 2.1

$$h \geq \frac{b}{2} \tan(30^\circ) \quad (2)$$

กำหนดให้ h เท่ากับ ระดับของจุดสูงสุดของหลังคาเทียบกับระดับฐานของจั่วหลังคา และ b เท่ากับ ความกว้างของจั่วหลังคา

เงื่อนไขของการให้แรงเพื่อกางโครงถัก กำหนดให้การให้แรงสามารถกระทำได้เฉพาะในแนวระดับ และกระทำได้ที่จุดต่อของโครงสร้างเท่านั้น

เงื่อนไขจุดตายกลไก จะได้อธิบายในหัวข้อ 3.1.3

เงื่อนไขความหนาแน่นหลังการพับเก็บ กำหนดให้ความหนาของโครงสร้างหลังคา หนาแน่นกว่าความหนาแน่น วัสดุปิดผิวผนัง และโครงสร้างพื้นเมื่อรวมแล้วต้องไม่เกิน 1.15 เมตรหลังการพับเก็บ ซึ่งจะทำให้สามารถขนส่งบ้านสองหลังได้โดยการขนส่งเพียงเที่ยวเดียว

เงื่อนไขช่องเปิดเพื่อระบายอากาศในแนวราบ กำหนดให้โครงถักที่ต้องมีช่องว่างสำหรับบานหน้าต่างโดยสอดคล้องกับแบบสถาปัตยกรรม จะยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง รูปแบบ และขนาดช่องเปิดได้ แต่จำนวนช่องเปิดจะต้องเท่าเดิม เพื่อการระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้ ออกแบบภายใต้สมมติฐานว่าทุกจุดต่อหมุนได้คล่อง และการให้แรงเพื่อกางโครงสร้าง มีลักษณะตามที่จะอธิบายต่อไปในหัวข้อ 3.1.3

3.1.2 การจัดทำแบบร่างของโครงถัก

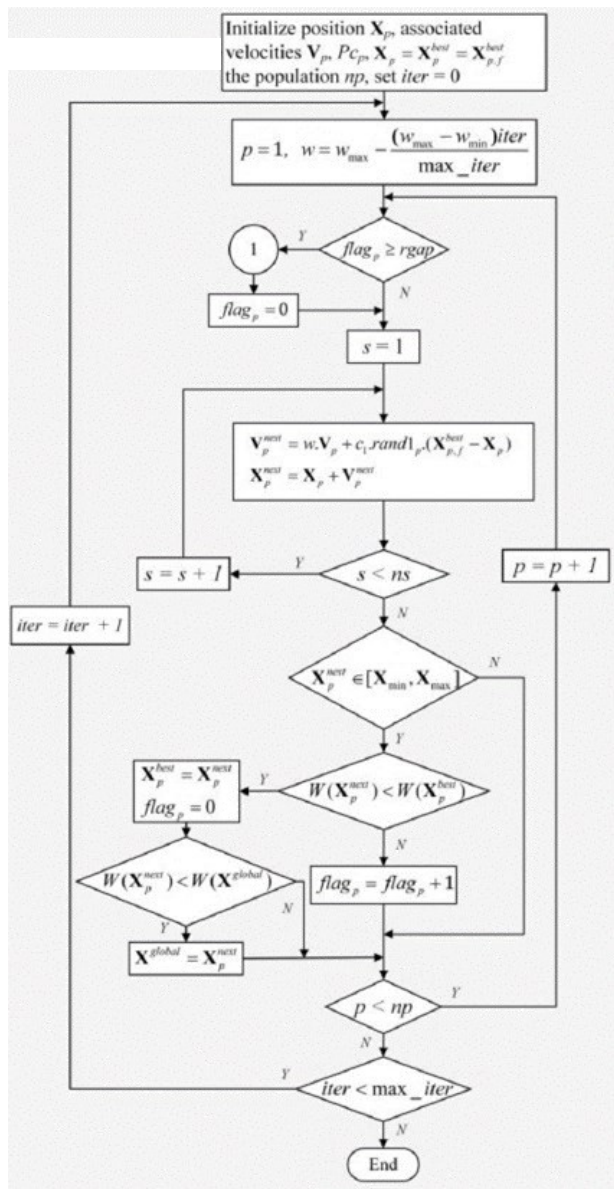
เราสามารถนำเงื่อนไขการออกแบบมาจัดทำแบบร่างเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของโครงถักได้ โดยพิจารณาเงื่อนไขของแบบสถาปัตยกรรม

แล้วสร้างจุดต่อที่โครงถักจำเป็นต้องมี และพิจารณาตามเงื่อนไขของเปิดเพื่อ การสัจจร เพื่อร่างบริเวณที่ห้ามมิให้มีข้อต่อใดผ่าน

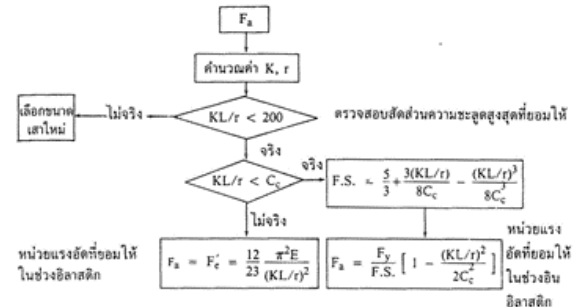
3.1.3 การออกแบบโครงถักตามแนวคิดการยกระดับวัตถุ

จากข้อจำกัดด้านการขนบรรทุก และเงื่อนไขของการออกแบบหลังคา จั่ว ทำให้ต้องมีการยกระดับโครงสร้างขึ้น แต่เนื่องจากเงื่อนไขของการให้แรง เพื่อทางโครงถัก ผู้วิจัยจึงใช้กลไกการยกระดับวัตถุ โดยการให้แรงด้านข้าง เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 8

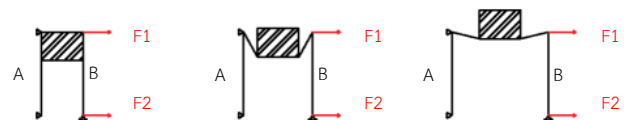
พิจารณาจากซ้ายไปขวา วัตถุสี่เหลี่ยมที่ถูกแรงถูกยกระดับขึ้นโดย กลไกต้องเป็นไปตามสมมติฐานว่ามีการให้แรงปฏิกิริยาแนวตั้งที่เหมาะสมที่ ปลายล่างของชิ้นส่วน A เพื่อรักษาสสมดุลกลในแนวแกนตั้ง และการให้แรง F1 และ F2 จะถูกปรับเปลี่ยนให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสมตลอดการเคลื่อนที่ ของกลไก เพื่อมิให้ชิ้นส่วน B เกิดการหมุน



รูปที่ 6 ผังงานอัลกอริทึมวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม



รูปที่ 7 ผังงานการหาค่าหน่วยแรงอัดที่ข้อมให้



รูปที่ 8 กลไกการยกระดับของวัตถุโดยการให้แรงด้านข้างเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ดี กระบวนการทางตามแนวความคิดดังกล่าวมีข้อจำกัดใน จังหวะที่ก้านส่งกำลังจะกางสุดและวางตัวเป็นแนวราบ เพราะก้านส่งจะ ส่งผ่านแรงตามแนวแกนเท่านั้น ซึ่งอาจทำให้ไม่มีแรงในแนวตั้งเพียงพอใน การยกวัตถุดังกล่าวจนก้านส่งวางตัวอยู่ในแนวราบได้ จึงกำหนดให้มีมุมขั้นต่ำ 20 องศาวัดลงจากแนวราบ ซึ่งจะเรียกว่า เงื่อนไขจุดตายกลไก

3.1.4 พิจารณาเสถียรภาพของโครงถัก

พิจารณาเสถียรภาพของโครงถักโดยกำหนดตำแหน่งของฐานรองรับที่ ปลายทั้งสองข้าง เป็นฐานรองรับชนิดหมุนแล้วใช้ค่า Degree of Static Indeterminacy ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (3)

$$DI = R_A + n_m + n_j + n_c \quad (3)$$

โดย DI คือ Degree of Static Indeterminacy R_A คือ จำนวนแรง ปฏิกิริยาไม่ทราบค่าที่ฐานรองรับ n_m คือ จำนวนแรงภายในที่ไม่ทราบค่า n_j คือ จำนวนสมการสมดุล ณ จุดต่อ และ n_c คือ จำนวนเงื่อนไขเชิงสถิตที่จุด หักในข้อต่อ

ในขั้นตอนนี้ จะไม่พิจารณาจุดหักในข้อต่อ เพราะถือว่าทุกจุดหักจะถูก ยึดให้อยู่ในสภาพที่ต้านทานการหมุนได้อย่างสมบูรณ์ในขั้นตอนการกางสุด

3.1.5 การออกแบบโครงถัก และจุดหักบนข้อต่อ

โครงสร้างสามเหลี่ยมจะทำให้เกิดปัญหาในการพับเก็บ ผู้วิจัยจึงอาศัย วิธีการเพิ่มตำแหน่งจุดหักบนข้อต่อหนึ่งของโครงสร้างรูปสามเหลี่ยมเพื่อ เปลี่ยนพฤติกรรมจากโครงสร้างเป็นกลไกข้อต่อ ทั้งนี้ เพื่อให้ทุกข้อต่อ สามารถพับเก็บเป็นแนวเส้นตรงเดียวได้ดังที่ได้พิสูจน์ในหัวข้อ 2.2.1

การวิเคราะห์หาตำแหน่งจุดหักของข้อต่อนี้ จะมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ 2 ตัว ได้แก่ s และ p แต่เนื่องจากเราทราบความยาวของ $s + p$ ได้จากการวัด ระยะด้านที่ยาวที่สุดของโครงสร้างสามเหลี่ยม แสดงได้ดังสมการ (4)

$$s + p = k \quad (4)$$

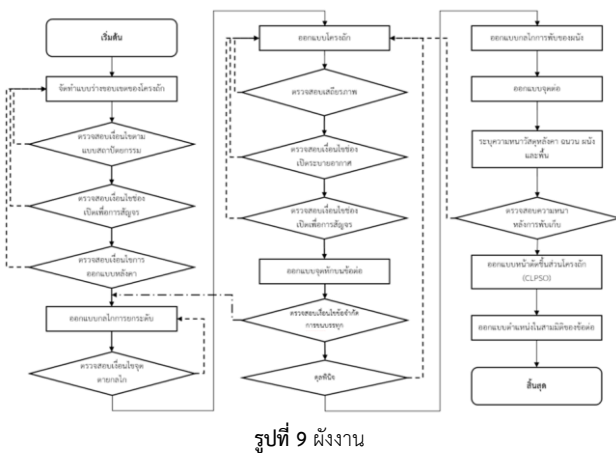
โดย k คือ ระยะด้านที่ยาวที่สุดของโครงสร้างสามเหลี่ยม เป็นตัวแปรที่ทราบค่า ดังนั้นเราจึงสามารถทราบค่า s และ p ได้จากการแก้สมการ (1) และ (4) ร่วมกัน และสามารถหาจุดหักงอข้อต่อได้

3.1.6 การออกแบบกระบวนการพับเก็บกำแพง

ผู้วิจัยจะพับกำแพงด้านในให้สำเร็จก่อนที่จะพับกำแพงด้านนอก แล้วจึงทำการพับหลังคา ฉนวน พื้น และโครงถักพร้อมกันเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยกระบวนการการพับเก็บ ทั้งนี้ ควรลดจำนวนทบการพับให้ได้มากที่สุดเพื่อลดความหนาหลังการพับเก็บ

3.1.7 สรุปกระบวนการออกแบบโครงสร้างพับได้

สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 9 เป็นที่สังเกตว่ากระบวนการดังกล่าว



3.2 การออกแบบโครงสร้าง

3.2.1 มาตรฐานการออกแบบ

ออกแบบโดยอ้างอิงมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ภาควิชาวิศวกรรมเหล็กที่ 6 และ AISI 360-16

3.2.2 น้ำหนักบรรทุก

กำหนดน้ำหนักบรรทุกคงที่ และน้ำหนักบรรทุกจรดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 และพิจารณาแรงลม 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 กรณีอาคารสูงไม่เกิน 10 เมตร

3.2.3 วัสดุเหล็ก

ใช้เหล็ก SS400 หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม (Hollow Section) เท่านั้น

3.2.4 ชนิดวัสดุ

ผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุดังแสดงในตารางที่ 3

3.3 การออกแบบหน้าตัดของโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด ด้วยระเบียบ

วิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) ร่วมกับการตรวจสอบอัตราส่วนความเค้น

3.3.1 การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย

การพิจารณาโครงสร้างที่อยู่อาศัยขนาดเล็กด้วยการก่อสร้างแบบพับได้ มีวัตถุประสงค์ต้องการเลือกวัสดุที่มีขนาดเหมาะสมที่สุด จากการนำวิธีการ

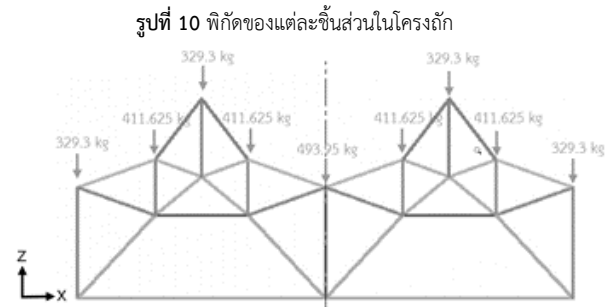
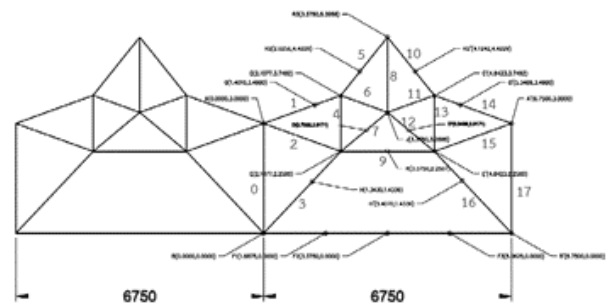
เรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) มาพิจารณาในส่วนโครงถัก โดยต้องการให้น้ำหนักของทั้งโครงถักมีค่าน้อยที่สุด และยังสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัย ซึ่งสร้างฟังก์ชันเป้าหมายได้ดังสมการ (5)

$$W(x) = \rho \sum_{i=1}^D \left(\sum_{j=1}^n l_{i,j} \right) A_i \quad (5)$$

โดย $W(x)$ คือน้ำหนักทั้งหมดของโครงถัก, ρ คือความหนาแน่นของเหล็ก, D คือจำนวนกลุ่มที่ต้องการหาขนาดหน้าตัด, n คือจำนวนชิ้นส่วนในกลุ่ม i , A_i คือพื้นที่หน้าตัดของของกลุ่มที่ i , $l_{i,j}$ คือความยาวของชิ้นส่วน j ในกลุ่ม i

3.3.2 การกำหนดเงื่อนไขและข้อมูลป้อนเข้า

ทำการระบุตำแหน่งของข้อต่อและชิ้นส่วน รวมถึงแรงที่กระทำที่ข้อต่อต่าง ๆ โดยกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดที่ทำการสุ่มอยู่ในช่วง 1 ถึง 15 ตารางเซนติเมตร, ขนาดประชากร (Population Size) เป็น 30, จำนวนรอบการวนซ้ำสูงสุด (Max Iteration) เท่ากับ 2,000, สัมประสิทธิ์ความเร่ง เป็น 1.49445, จำนวนครั้งที่จะไปเรียนรู้ตำแหน่งใหม่ (Refreshing Gap) เป็น 7



3.4 การวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างด้วย SAP2000

ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองใน SAP2000 ให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ในรูปแบบของโครงถักและโครงเฟรมสามมิติ เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO)

ตารางที่ 1 น้ำหนักบรรทุกคงที่

แรงกระทำ	ค่าน้ำหนักต่อหน่วย	หน่วย
หลังคาเมทัลชีทและฉนวนพื่อโฟม	25	kg/m ²
แผ่นพื้นเมอร์ธาและตงพื้น	40	kg/m ²
ผนังฉนวนคิ้วชิวาแนล	25	kg/m ²
น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม	120	kg/m ²

ตารางที่ 2 น้ำหนักบรรทุกจร

แรงกระทำ	ค่าน้ำหนักต่อหน่วย	หน่วย
หลังคา	50	kg/m ²
พื้นที่ใช้สอยทั่วไป	200	kg/m ²

ตารางที่ 3 วัสดุ

วัสดุประสงค์	ชนิดวัสดุ
วัสดุผนังหลังคา	เมทัลชีทแผ่นเรียบ ลอนหนา 20 มม.
ฉนวนหลังคา	ฉนวนกันความร้อนพียูโฟม หนา 25 มม. และ 50 มม.
ผนังสำเร็จรูป	ผนังแกนตีเหล็กหนา 50 มม.
วัสดุปิดผิวผนังด้านนอก	เมทัลชีทแผ่นเรียบ ลอนหนา 20 มม.
แผ่นพื้น	แผ่นพื้นเอนเออร์บอร์ด หนา 20 มม.
ตงพื้น	เหล็ก HSS 50x50x2.3
วัสดุโครงสร้างอื่น	เหล็ก ขนาดหน้าตัดระบุดังตารางที่ 4

4. ผลการออกแบบ

4.1 ผลลัพธ์การคำนวณหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง

4.1.1 ผลลัพธ์การคำนวณหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง ด้วยวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม ร่วมกับการตรวจสอบอัตราส่วนความเค้น

จากผลลัพธ์ในการคำนวณในการสุ่มขนาดหน้าตัดทุกชิ้นส่วน พบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดมีน้ำหนัก 56.9 กิโลกรัม ดังรูปที่ 12

4.1.2 ผลลัพธ์การคำนวณหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างด้วยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000

การออกแบบด้วยวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) จะให้ผลลัพธ์ที่มีขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกันในทุกชิ้นส่วน ซึ่งยากแก่การทำงานจริง ผู้วิจัยจึงนำชิ้นส่วนที่มีขนาดใกล้เคียงกันมาจัดกลุ่มเป็นรูปแบบต่าง ๆ ควบคู่กับการตรวจสอบอัตราส่วนความเค้นด้วย SAP2000 จนได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดเป็นการจัดกลุ่มหน้าตัดดังต่อไปนี้ (ดังรูปที่ 13)

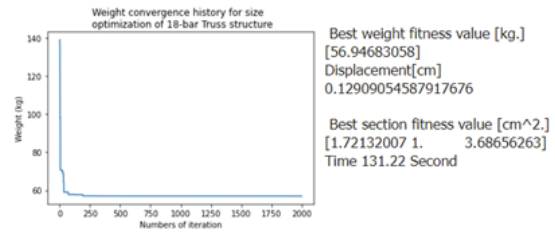
กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย ชิ้นส่วนที่ 0, 3, 16 และชิ้นส่วนที่ 17 (ตามรูปที่ 10) ใช้เหล็กหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่หน้าตัด 1.72 ตารางเซนติเมตร

กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย ชิ้นส่วนที่ 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 และชิ้นส่วนที่ 15 (ตามรูปที่ 10) ต้องใช้เหล็กหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่หน้าตัด 1.00 ตารางเซนติเมตร

4.1.3 สรุปผลลัพธ์การคำนวณหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง

เมื่อใช้รูปแบบการจัดกลุ่มชิ้นส่วนที่ใช้ในวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม มาเป็นแนวทางในการจัดกลุ่มชิ้นส่วน ในโปรแกรม SAP2000 จะทำให้เกิดประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของหน้าตัดสูงสุด (Utilization Ratio) ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนต่าง ๆ ค่อนข้างสอดคล้องกับวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม มีเพียงชิ้นส่วนตลอดแนวด้านบนสุดของโครงถัก ที่รับน้ำหนักโดยตรงจากแป ซึ่งในโปรแกรม SAP2000 จะพิจารณาทั้งโครงสร้างอาคาร ทำให้มีการคำนึงถึง ทั้งแรงในแนวตั้งและโมเมนต์ดัดที่

ถ่ายมาสู่ชิ้นส่วน จึงจำเป็นต้องใช้เหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม จึงเลือกใช้เหล็กในโครงสร้างต่าง ๆ ดังตารางที่ 4



รูปที่ 12 น้ำหนักโครงสร้างจากการสุ่มหน้าตัดคำนวณ 2,000 รอบด้วย CLPSO



รูปที่ 13 ผลลัพธ์การหาขนาดชิ้นส่วนโครงสร้างด้วยโปรแกรม SAP2000

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การคำนวณหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง

ตำแหน่ง	หน้าตัด	
เหล็กโครงถัก	ชิ้นส่วนรับแปช่วงบน	HSS 38x38x2.3
	ชิ้นส่วนรับแปช่วงล่าง	HSS 50x50x2.3
	ชิ้นส่วนโครงถักส่วนบน	HSS 25x25x2.3
	ชิ้นส่วนโครงถักส่วนล่าง	HSS 38x38x2.3
เหล็กหลังคา	ชิ้นส่วนแปหลังคา	HSS 50x50x2.3
เหล็กเสา	ชิ้นส่วนเสาขอบนอก	HSS 50x50x2.3
เหล็กคานพื้น	ชิ้นส่วนคานรับผนังและตงพื้น	HSS 200x200x6.0
	ชิ้นส่วนคานที่รับเฉพาะผนัง	HSS 100x50x2.3

4.2 การออกแบบจุดต่อ

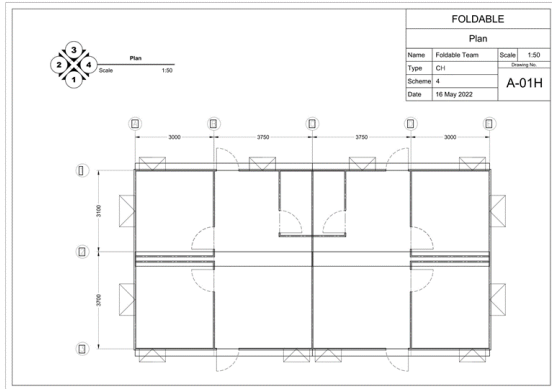
ผู้วิจัยเลือกเชื่อมจุดต่อต่าง ๆ ด้วย สลักเกลียวเพื่อให้ง่ายต่อการผลิต และเพื่อให้ข้อต่อต่าง ๆ สามารถหมุนได้ตามที่ต้องการ

เมื่อพิจารณาแรงปฏิกิริยา และการวิเคราะห์ออกแบบอย่างละเอียด เห็นควรใช้สลักเกลียวประเภท A325X M16 โดยไม่มีแผ่นประกบ และตำแหน่งจุดศูนย์กลางของสลักเกลียวต้องห่างจากขอบข้อของชิ้นส่วนข้อต่อไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร

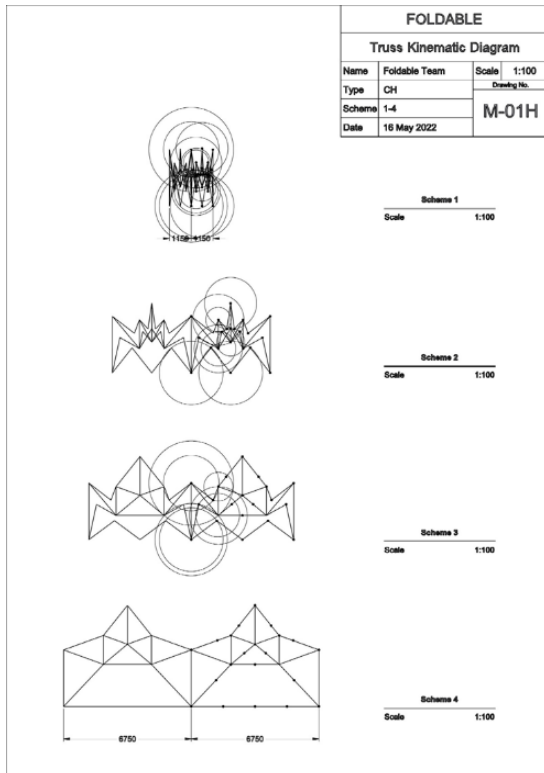
เมื่อพิจารณาพร้อมกับการจัดวางตำแหน่งในสามมิติของข้อต่อบนโครงถัก จะได้ประเภทจุดต่อที่แตกต่างกันเป็นจำนวนสามแบบ ได้แก่จุดต่อแบบข้อต่อทาบกัน จุดต่อแบบข้อต่อซ้อนกันโดยหน้าตัดของข้อต่อต่างกัน (ข้อต่อสอดรับกัน) และจุดต่อแบบข้อต่อซ้อนกันโดยหน้าตัดของข้อต่อเท่ากัน ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.3.4

4.3 แบบ

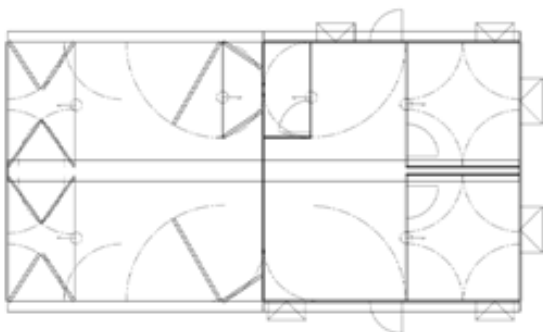
4.3.1 แบบสถาปัตยกรรม



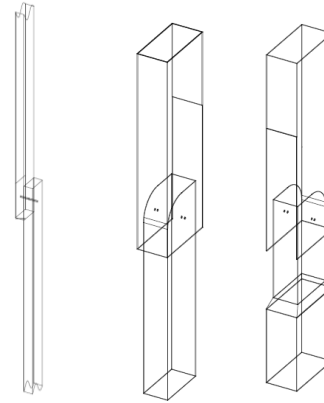
4.3.2 แผนภาพคินแมติก



4.3.3 การปักกำแพง



4.3.4 แบบขยายจุดต่อ



รูปที่ 14 จุดต่อ (ซ้าย) แบบทาบต่อกัน (กลาง) แบบสอดรับกัน (ขวา) แบบบาก

จุดต่อแบบทาบต่อกันใช้ในกรณีข้อต่ออยู่ในระดับความลึกที่ต่างกัน แบบสอดรับกันใช้ในกรณีข้อต่ออยู่ในระดับความลึกเดียวกัน แต่มีขนาดหน้าตัดที่ต่างกัน ส่วนแบบบากใช้ในกรณีข้อต่ออยู่ในระดับความลึกเดียวกัน แต่มีขนาดหน้าตัดที่เท่ากัน

4.4 บัญชีประมาณราคา

ตารางที่ 5 บัญชีประมาณปริมาณวัสดุและราคาก่อสร้าง

รายการ	หน่วย	จำนวน	ราคาวัสดุ	รวม	ค่าแรง	รวม	ราคารวม
หมวดงานโครงสร้าง							
HSS 25 x 25 x 2.3 mm. 1.61 kg/m.	กก.	116	27	3,124	11	1,276	4,401
HSS 38 x 38 x 2.3 mm. 2.56 kg/m.	กก.	106	27	2,844	11	1,166	4,010
HSS 50 x 50 x 2.3 mm. 3.34 kg/m.	กก.	390	27	10,483	11	4,298	14,781
HSS 100 x 50 x 2.3 mm. 5.14 kg/m.	กก.	70	27	1,881	13	908	2,789
HSS 200 x 200 x 6.0 mm. 35.8 kg/m.	กก.	967	27	26,015	13	12,572	38,586
Metal sheet 760 ทหนา 0.5 mm	ตร.ม.	59	230	13,576	70	4,132	17,707
EPS foam ทหนา 50 mm	ตร.ม.	46	97	4,463	29	1,339	5,801
แผ่นพื้นเฌอรา ทหนา 20 mm	ตร.ม.	46	307	14,073	92	4,222	18,295
ผนัง Sandwich Panel พร้อมอุปกรณ์ ทหนา 75 mm	ชุด	160	700	112,035	210	33,611	145,646
Bolt A325 M16 ครบชุด	ชุด	88	100	8,800	30	2,640	11,440
รวมเงิน						263,457	
ต่อตารางเมตร						5,739	

เมื่อประมาณราคาโดยอ้างอิงราคาจากกรมบัญชีกลาง ไม่รวมค่าขนส่ง ดังตารางที่ 5 พบว่า มีราคางานโครงสร้างชั้นต่ำ 5,740 บาทต่อตารางเมตร หากอ้างอิงราคาก่อสร้างบ้านทั่วไปที่ 15,000 บาทต่อตารางเมตร จะคิดเป็น 38% ของราคาก่อสร้างทั้งหมด นับว่ามีราคาสูง หากพิจารณาถึงการนำกลับไปใช้ซ้ำได้หลายครั้ง จะเหมาะสมมากกว่าการก่อสร้างด้วยคอนกรีต ซึ่งมักจะแตกร้าวเสียหายเมื่อมีการรื้อถอน

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 ผลการวิจัย

จากผลงานวิจัยพบว่า เราสามารถออกแบบโครงสร้างที่อยู่อาศัยแบบพับได้ ที่มีรูปแบบเหมาะสมกับสภาพอากาศเมืองร้อนได้ด้วยการออกแบบให้มีหลังคาจั่ว โดยอาศัยหลักการออกแบบชิ้นส่วนทางกล โดยมีขนาดหลังคาพับเก็บกว้าง 2.3 เมตร ยาว 6.8 เมตร และสูง 3.0 เมตร จึงสามารถขนส่งได้ด้วยรถบรรทุกทุกล้อที่มีขนาดความยาว 7.2 เมตร และความกว้างตั้งแต่ 2.3 เมตรขึ้นไปได้ ตามพระราชบัญญัติจราจรทางบก พ.ศ. 2522 และได้เลือกใช้วัสดุที่มีความเหมาะสม และประหยัด โดยสามารถนำผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม (CLPSO) มาใช้พิจารณาออกแบบหน้าตัดโครงถักร่วมกับโปรแกรม SAP2000 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ด้านสถาปัตยกรรม สามารถจัดทำแบบทางเลือกเพิ่มเติม โดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของช่องเปิดต่างๆ เพื่อรองรับการนำไปติดตั้งในพื้นที่ต่าง ๆ ที่อาจมีทิศทางลม หรือแสงแดดแตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อสร้างสภาวะน่าสบายสำหรับผู้อยู่อาศัยอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

ในขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนของโครงถัก สามารถนำกระบวนการออกแบบไปพัฒนาเป็นระเบียบวิธีการคิดเพื่อการออกแบบโครงถักพับได้ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของกลุ่มอนุภาคแบบเบ็ดเสร็จ โดยอาจตั้งวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของวัสดุให้ได้มากที่สุด

ในการออกแบบกลไกการพับ สามารถนำความรู้เรื่องการออกแบบชิ้นส่วนทางกลมาพัฒนาการพับเพื่อลดกำลังเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ลง หรือสามารถพับและกางได้ด้วยกำลังของมนุษย์

ในด้านของการออกแบบโครงสร้าง ควรนำข้อต่อแต่ละชนิดไปวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบกำลังของวัสดุสำหรับเนื้อวัสดุที่หายไปบริเวณข้อต่อที่ถูกลบ

ในด้านการประเมินราคา สามารถทำการประเมินค่าขนส่งจากแหล่งผลิตหรือสถานที่จัดเก็บไปยังสถานที่ก่อสร้าง และนำจำนวนรอบการใช้ซ้ำตลอดอายุการใช้งานของวัสดุมาวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการผลิตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้แรงบันดาลใจ ก่อให้เกิดหัวข้องานวิจัยชิ้นนี้ ทั้งยังให้คำแนะนำ ความรู้ และกำลังใจอันสำคัญกับผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และขอขอบคุณ นายอานัติ สุธา นิสิตระดับปริญญาเอก และ

นางสาวธมลวรรณ สุวรรณศรี นิสิตระดับปริญญาโท ที่คอยสนับสนุนผู้วิจัยอย่างเต็มที่ ทั้งได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับกระบวนการวิจัย และการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ออกแบบ งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings. American National Standard ANSI/AISC 360-16. (n.p.), 2016.
- [2] J. Rungamomrat. *Fundamental Structural Analysis*. 2020, pp. 31-39
- [3] J.J. Liang, A.K. Qin, P.N. Suganthan and S. Basker. Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimization of Multimodal Functions. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 10, pp. 281-286, 2006.
- [4] J.J. Liang, A.K. Qin, P.N. Suganthan and S. Basker. Evaluation of Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer. *ICONIP*. pp. 230-235, 2004.
- [5] Q. Roslan, S. Ibrahim, R. Affandi, M. Nawawi and A. Baharun. "A literature review on the improvement strategies of passive design for the roofing system of the modern house in a hot and humid climate region". *Frontiers of Architectural Research*, 5, pp. 126-133, 2016.
- [6] R.L. Norton. *Design of Machinery*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2019
- [7] T.H. Van, S. Tangaramvong, S. Limkatanyu and H. Nguyen-Xuan. "Two-phase ESO and comprehensive learning PSO method for structural optimization with discrete steel sections". *Advance in Engineering Software*, pp. 4-6, 2022.
- [8] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, T. Vo-Duy and T. Nguyen-Trang. "An adaptive elitist differential evolution for optimization of truss structures with discrete design variables". *Computers and Structures*, pp. 59-60, 2016.
- [9] การเคหะแห่งชาติ. แบบมาตรฐาน โครงการบ้านเช่าสำหรับผู้มีรายได้น้อย แบบก่อสร้างแบบ-C บ้านแฝดชั้นเดียว, 2564.
- [10] ทักษิณ เทพชาติศรี, อัครวิชร เล่นวารีย์. *พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก*. พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.
- [11] ทักษิณ เทพชาติศรี. *พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก (ASD, PD, LRFD)*. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.), 2541.
- [12] อรรถนัย เศรษฐบุร. *อาคารเขียว. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2561, หน้า 41-43 และ 141*