การออกแบบโทโพโลยีโครงสร้างเหล็กถักประกอบผิวอาคารด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด

Topology optimization of steel cross brace in building facade design

นายแสงแดด มณีวงศ์ นางสาวสิรกร กิตกำธร นายอินทนนท์ ฉัตรชัยพลรัตน์ และ รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งอร่างวงศ์

[1,2,3] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร*

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการออกแบบโทโพโลยีด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Topology optimization) ของโครงสร้างเหล็กถักประกอบผิวอาคาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์หาแนวทางการออกแบบโครงสร้างเหล็กถักประกอบผิวอาคารที่สามารถลดต้นทุนวัสดุและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะเดียวกันยังคงรักษาความสามารถในการรับแรงตามมาตรฐานการใช้งาน ผ่านการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Direct Stiffness Method ร่วมกับวิธีการ Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) ในการปรับปรุงโครงสร้างเหล็กถัก ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่ทันสมัย ได้แก่ (1) โปรแกรม Rhinoceros3D (2) โปรแกรม Grasshopper และ (3) ส่วนขยาย Karamba3D จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบรูปร่าง ปริมาตรของเหล็ก และน้ำหนักของโครงสร้างที่ใช้ระหว่างก่อนและหลังทำการปรับปรุง อีกทั้งยังทำการทดสอบเพื่อตรวจความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 พบว่าการออกแบบโทโพโลยีสามารถลดการใช้วัสดุในการออกแบบได้จริงโดยยังคงไว้ซึ่งความสามารถในการรับแรงตามมาตรฐาน นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดตัวแปรซึ่งส่งผลต่อปริมาตรคงเหลือของโครงสร้างสุดท้ายได้อีกด้วย

ผลการศึกษานี้ในครั้งนี้ สนับสนุนการนำการออกแบบโทโพโลยีด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดมาใช้เป็นวิธีในการยกระดับการออกแบบโครงสร้างเหล็กถัก โดยวิธีนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนแต่ยังส่งเสริมแนวทางการก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมผ่านการลดปริมาตรการใช้ทรัพยากร

คำสำคัญ: การหาคำตอบที่ดีที่สุด, BESO, Direct Stiffness Method, โครงสร้างเหล็กถัก

Abstract

This thesis presents a method for optimizing steel truss structures in building façade design. The objective is to determine the optimum design of the cross-brace structure for façade applications with the aim to reduce material costs and environmental impacts while maintaining load-bearing performance according to standards. This is achieved through mathematical modeling using the direct stiffness method and the Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) algorithm. The research tools used are: (1) Rhinoceros3D software, (2) Grasshopper software, and (3) Karamba3D plugin. The result suggests that topology optimization can effectively reduce material usage in construction while maintaining load-bearing performance. Which is validated by SAP2000 Analysis Software. The method also allows designers to determine the final volume of the optimized structure.

This study supports the implementation of topology optimization to enhance structural facade efficiency. This approach not only contributes to cost reduction but also promotes sustainable construction practices through reduced material consumption.

Key words: Structural optimization, BESO, Direct stiffness method, Steel truss structures

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

1.1.1 ประวัติ

ในชีวิตประจำวันนี้ เทคโนโลยีมีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในวงการต่างๆ เช่น การขนส่ง งานอุตสาหกรรม งานระบบ หนึ่งในวงการที่เราสนใจนั้นคือการก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นการผลิตโครงสร้างผ่านกระบวนการก่อสร้างสำเร็จรูป (Prefabricated) การประยุกต์คณิตศาสตร์ทางคอมพิวเตอร์ควบคู่กับการวิเคราะห์โครงสร้าง และการส่งเสริมให้เกิดการก่อสร้างอย่างยั่งยืน

จากอดีตจนถึงปัจจุบันในการพัฒนางานก่อสร้างมักเจอความท้าทายในเรื่องต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ต้นทุน ประสิทธิภาพ หรือผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อม แต่เดิมวิศวกรจะพึ่งพาประสบการณ์ในการออกแบบโครงสร้าง ถึงแม้ว่าจะทำงานได้ดีแต่การออกแบบวิธีนี้อาจนำไปสู่การออกแบบที่สิ้นเปลืองต้นทุนและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เป็นการจำลองโครงสร้างผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสามารถทดลองใส่แรงกระทำลงบนแบบจำลองที่สร้างขึ้นแล้วให้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อให้เห็นถึงผลของแรงที่มากระทำกับโครงสร้าง จึงนำไปสู่การทดสอบความสามารถของตัวโครงสร้าง และการปรับปรุงตัวโครงสร้างเพื่อให้เกิดประโยชน์ในหลายด้าน

ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงงาน จึงเห็นถึงความสำคัญที่จะลดปริมาณวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง แต่ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพในมาตรฐานการใช้งาน โดยการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการจำลองโครงสร้างของวัสดุในคอมพิวเตอร์

1.1.2 นิยาม

การออกแบบโทโพโลยีด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Topology optimization) คือรูปแบบการกำหนดโครงสร้างซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองโครงสร้างของวัสดุในคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่ง การออกแบบโทโพโลยีด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด ให้ความอิสระในการออกแบบโครงสร้างจากกรอบของรูปทรงเดิมอย่างรูปทรงทางเรขาคณิต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

โครงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาหาความเป็นไปได้ในการพัฒนาโครงสร้างให้ลดปริมาณของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างปัจจุบันโดยยังคงไว้ซึ่งความแข็งแรงของโครงสร้าง อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะถูกอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กถักให้มีประสิทธิภาพ และลดปริมาณต้นทุนวัสดุโดยยังคงประสิทธิภาพการรับแรงตามมาตรฐานการใช้งาน โดยผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.เพื่อสาธิตวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดของโครงถักประกอบผิวอาคาร ด้วยการใช้ส่วนขยาย Karamba 3D

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดโครงสร้างในงานโครงสร้างเหล็กถักประกอบผิวอาคาร โดยที่ยังคงความปลอดภัยไว้แบบเดิมโดยการศึกษานี้ ศึกษากับอาคารตัวอย่างขนาด 30x30x70 เมตร กว้างxยาวxสูง ตามลำดับ ภายใต้น้ำหนักและแรงมาตรฐานของ มยพ.1311-50 ด้วยวิธีการ BESO ผ่านการใช้เครื่องมือ Rhino, Grasshopper, Karamba3D และจะตวจสอบเงื่อนไขการออกแบบด้วยโปรแกรมโครงสร้างคือ Sap2000

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

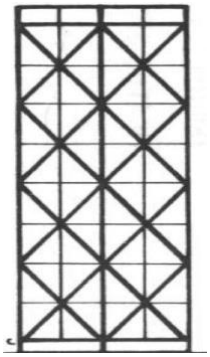
การใช้วัสดุที่น้อยลงซึ่งจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและน้ำหนักของโครงสร้างที่ลดลง การประหยัดค่าใช้จ่าย และความยืดหยุ่นด้านความสวยงาม การพัฒนาคุณภาพของโครงสร้างให้เข้ากับโลกยุคใหม่ ทั้งยังสามารถพัฒนาต่อไปใช้ในศาสตร์สาขาอื่นนอกเหนือจากโครงสร้างได้ รวมถึงอุตสาหกรรมการผลิตแบบการพิมพ์ 3 มิติ

2. แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกณฑ์ในการออกแบบ (Design Criteria)

2.1.1 กำหนดรูปร่างของโครงสร้างเริ่มต้นที่ต้องการที่จะปรับปรุง

ทำจากการกำหนดรูปร่างจากตัวโปรแกรม Rhinoceros3D ผ่านโปรแกรม Grasshopper ทำให้เกิดรูปร่างที่ต้องการโดยในโครงงานนี้จะใช้เป็นรูปร่าง Diagrid (ดังรูปที่ 2.1) โดยมีหลักการขึ้นให้มีโหนดเพื่อจะรับแรงและ ชิ้นส่วน เพื่อที่จะวิเคราะห์ผลต่อไป รูปที่นำมาเป็นรูปพื้นฐานแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 แบบจำลองที่ใช้เป็นตัวอย่างในการขึ้นโปรแกรม

2.1.2 กำหนดขนาดแรงและทิศทางที่จะกระทำกับตัวโครงสร้าง

หลังจากการกำหนดรูปร่าง ทำการใส่แรงที่กระทำกับโครงสร้างเพื่อหารูปร่างที่ดีที่สุดในการรับแรงดังต่อไปนี้

- แรงลมอ้างอิงจาก (มยผ. 1311-50 มารตฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร)

โดยคำนวณผ่านวิธีแรงลมสถิตเทียบเท่าและการตอบสนองในทิศทางลมโดยวิธีอย่างละเอียดเนื่องจากตรงตามข้อกำหนดที่แสดงไว้ว่า ระบบโครงสร้างต้านลมของอาคารเตี้ยและอาคารสูงปานกลางที่มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร และผนังภายนอกอาคาร (cladding) ของอาคารทุกประเภท

- แรงน้ำหนักของตัวโครงสร้างเหล็กถักที่ได้จากโปรแกรม

2.2 Direct Stiffness Analysis

Direct stiffness Analysis คือการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของโครงสร้างกับแรงที่เกิดขึ้นผ่านทาง Stiffness ของชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยสามารถวิเคราะห์จากแรงภายนอกหรือระยะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน ผ่านทางค่า เมทริกซ์ K หรือ Stiffness matrix ผ่านทางสมการ2.1

$$F = KU \qquad (2.1)$$

F = แรงภายนอกที่ทำการใส่เข้าไปในโครงสร้าง

K = stiffness matrix ของโครงสร้าง

U = ระยะที่เคลื่อนที่ไปของจุดภายในแต่ละจุดของโครงสร้าง

2.3 การออกแบบโทโพโลยีด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Topology Optimization)

การออกแบบโทโพโลยีด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Topology Optimization) เป็นการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ นั้นคือ Finite Element Analysis (FEA) ในการวิเคราะห์หารูปแบบโครงสร้าง จำลองโครงสร้าง และคำนวณหาผลลัพธ์ โดยการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อสร้างโครงสร้างที่มีการใช้วัสดุลดลง ขณะที่ยังคงเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบ ซึ่งจะให้ความสำคัญกับชิ้นส่วนที่จำเป็นในโครงสร้างสูงและเลือกเก็บชิ้นส่วนเหล่านั้น ขณะเดียวกันจะลดความสำคัญกับส่วนที่ไม่จำเป็นในโครงสร้างและตัดชิ้นส่วนเหล่านั้นออก

2.4 BESO (Bi-directional Evolutionary Structural optimization)

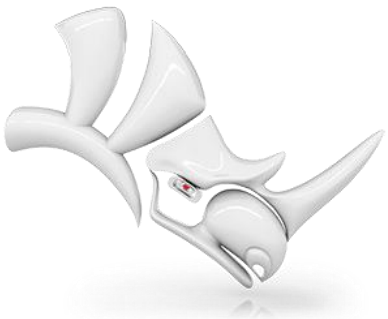
Bi-directional Evolutionary Structural optimization หรือ BESO เป็นหนึ่งในกระบวนการทำ การปรับปรุงซึ่งถูกพัฒนามาจาก Evolutionary Structural Optimization (ESO) ซึ่งเป็นการทำให้โครงสร้างค่อยๆเข้าสู่สภาวะที่คุ้มค่ามากที่สุดผ่านการลบส่วนประกอบหรือ element ที่มีค่าเค้นหรือ stress ต่ำที่สุดออก เพื่อที่จะหารูปแบบโครงสร้างที่มีค่า Stiffness มากที่สุด แต่ใน BESO จะเพิ่มกระบวนการเพิ่มชิ้นส่วนเข้าไปในโครงสร้างด้วย โดยจะทำการเพิ่มตำแหน่งที่อยู่ติดกับชิ้นส่วนที่ที่มีค่าความเค้นมากที่สุดเพื่อเป็นการลดความเค้นของชิ้นส่วนนั้น ในขณะเดียวกันจะใช้ FEA ในการวิเคราะห์โครงสร้างควบคู่กันไปด้วย

2.5 โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้าง

ในการทำโครงงานครั้งนี้ได้มีการใช้โปรแกรมที่ช่วยให้การขึ้นรูปโครงสร้างและคำนวนเป็นไปได้อย่างราบรื่นซึ่งจะประกอบด้วย

2.5.1 Rhinoceros 3D

Rhinoceros3D หรือ Rhino3D เป็นซอฟต์แวร์การออกแบบกราฟิกและการออกแบบทางคอมพิวเตอร์สามมิติที่เชื่อมโยงกับแอปพลิเคชัน CAD (Computer-Aided Design) โดยตัวโปรแกรมสามารถใช้ออกแบบได้ในหลายอุตสาหกรรม ทั้งสถาปัตยกรรม วิศวกรรม การออกแบบเครื่องประดับ และการศึกษา ซึ่งตัวโปรแกรมสามารถออกแบบขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายขนาด



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงรูปโปรแกรมRhino3D

2.5.2 Grasshopper

กราสฮอปเปอร์ (Grasshopper) เป็นส่วนขยายเพิ่มเติมขึ้นมาจากโปรแกรมการขึ้นรูปสามมิติอย่าง Rhino3D โดยจะใช้การเขียนโปรแกรมแบบวิชวล (Visual Programming) เพื่อลดการใช้ความรู้ทางเขียนโปรแกรมที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปสามมิติ

รูปที่ 2.4 ภาพแสดงรูปโปรแกรมGrasshopper

2.5.3 Karamba3D

Karamba3D เป็นเครื่องมือส่วนขยายในพาราเมตริกของกราสฮอปเปอร์ในโปรแกรมการสร้างแบบสามมิติ ที่จะทำให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์โครงสร้างแบบไฟไนต์เอเลเมนต์ (FEA) ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้นักออกแบบได้ใช้ในการออกแบบในขั้นต้น

รูปที่ 2.5 ภาพแสดงรูปโปรแกรมKaramba3D

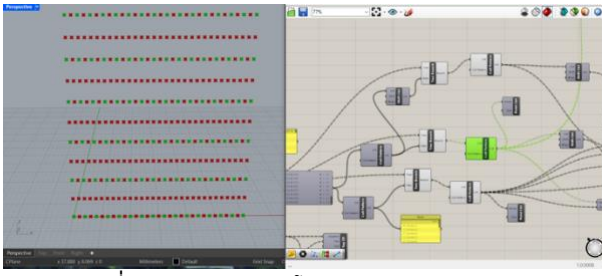
3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 สร้างรูปร่างในแบบจำลอง

ในขั้นตอนแรกจะทำการขึ้นรูปโครงสร้างที่ต้องการในการปรับปรุงโครงสร้างในโปรแกรม Grasshopper ซึ่งตัวโครงสร้างจะแสดงผลอยู่ในโปรแกรม Rhino3D โดยจะขึ้นรูปโครงสร้างทำอยู่ในรูปแบบของตาข่ายหรือโครงถักเพื่อให้สามารถนำ BESO ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้าง

โดยมีขั้นตอนในการสร้างโมเดลดังนี้

- สร้างระนาบหน้าตัดขึ้นมาด้วยคำสั่ง “Plane Surface”
- แบ่งหน้าตัดด้วยคำสั่ง “Divide Surface“ให้หน้าตัดแบ่งเป็นจุดย่อย
- เลือกจุดในแต่ละแถวสลับกัน
- เชื่อมจุดในแต่ละแถวที่สลับกันด้วยเส้นตรงดังรูป
- รวมทั้งเส้น และ โหนดเข้าด้วยกันเพื่อให้รวมในรูปเดียวกันด้วยคำสั่ง Assemble Model
- กำหนด Support และ แรงที่กระทำกับตัวตึกโดยแรงที่ใช้จะอธิบายในหัวข้อถัดไป
- นำตัวโมเดลเข้าคำสั่ง BESO ที่อยู่ใน Karamba และแสดงผลออกมา



รูปที่ 3.1 ภาพการทำงานโปรแกรม Grasshopper

3.2 กำหนดข้อจำกัดและเงื่อนไขในแบบจำลอง

ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดค่าและเงื่อนไขต่าง ๆที่ส่งผลต่อโครงสร้าง

3.2.1 ข้อมูลมั่วไปของอาคารที่ใช้ทำการออกแบบดังนี้

รูปทรงอาคาร : กว้าง 30 เมตร x ยาว 30 เมตร

ความสูงของอาคาร : 70 เมตร

สถานที่ตั้ง : ในบริเวณพื้นที่เมืองของจังหวัดกรุงเทพมหานคร

วัสดุที่ใช้ : เหล็กท่อกลม (S235)

: 19 เซนติเมตร, หนา 0.7 เซนติเมตร

3.2.2 แรงที่กระทำเข้าด้านข้างของโครงถักที่กำหนด

จากหัวข้อ 2.1.2 จึงใช้วิธีการคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าอย่างละเอียดเนื่องจากความสูงของตึกคือ 70 เมตร ซึ่งเกิน 80 เมตรที่มาตรฐานกำหนดแต่เพื่อความแม่นยำและสะดวกจึงใช้การคำนวณแบบละเอียดแทน

หน่วยแรงลมออกแบบที่กระทำบนผิวนอกของอาคาร

$$p = I_w q C_e C_g C_p \quad (3.1)$$

ได้ค่าต่างๆดังนี้

$$I_W = 1.0 \quad (3.2)$$

-หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q) คำนวณได้จาก

$$q = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{g}\right)v^2 \quad (3.3)$$

จะได้ค่า q ที่ได้เท่ากับ 39.81 kg/m2

-ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (Ce)

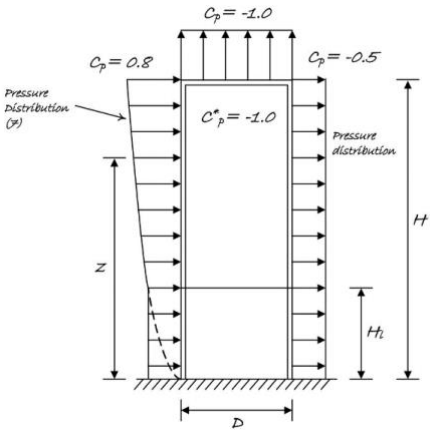
$$C_e = 0.4\left(\frac{Z}{30}\right)^{0.72} \quad (3.4)$$

-ค่าประกอบเนื่องจากการกรรโชกของลม (C_g)

$$C_g = 1 + g_p\left(\frac{\sigma}{M}\right) \quad (3.5)$$

-ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม Cp

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคาร ทิศทางลม และลักษณะการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมตามความสูงอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม ที่กระทำภายนอกอาคาร สำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารและระบบโครงสร้างหลักของอาคาร โดยประมาณค่าดังรูป



รูปที่ 3.2 แสดงค่า Cp

น้ำหนักที่คำนวณได้จากโปรแกรม Rhino W = 289.786 ตัน

นำค่าน้ำหนักมาคำนวณตาม Load Combination จาก มยผ. ดังนี้

$$UL = \begin{cases} 1.7DL + 2.0LL & Eq.(1) \\ 0.75(1.7DL + 2.0LL \pm 2.0WL) & Eq.(2) \\ 0.9DL \pm 1.3WL \quad 1.0\,EQ & Eq.(3) \\ 0.75(1.7DL + 2.0LL \pm \sout{2.0EL}) & Eq.(4) \\ 0.9DL \pm \sout{1.35L} \quad 1.0EQ & Eq.(5) \end{cases}$$

รูปที่ 3.3 1Load Combination

3.3 สรุปเป็นแรงที่กระทำเข้าแต่ละโหนด

ตารางที่ 1 *ตารางแสดงแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง*

			LOAD COMBINATION		FORCE ON NODE	
floor	Windward	LEEWARD	1.5*WL(WINWARD)	1.5*WL(LEEWARD)	WINWARD	LEEWARD
roof	34.1	12.92	51.09	19.39	3.41	1.29
20	65.7	25.85	98.48	38.77	6.16	2.58
19	63.1	25.85	94.72	38.77	6.31	2.58
18	60.6	25.85	90.90	38.77	5.68	2.58
17	58.0	25.85	87.02	38.77	5.80	2.58
16	55.4	25.85	83.07	38.77	5.19	2.58
15	52.7	25.85	79.04	38.77	5.27	2.58
14	50.0	25.85	74.94	38.77	4.68	2.58
13	47.2	25.85	70.74	38.77	4.72	2.58
12	44.3	25.85	66.44	38.77	4.15	2.58
11	41.4	25.85	62.04	38.77	4.14	2.58
10	38.3	25.85	57.51	38.77	3.59	2.58
9	37.0	25.85	55.52	38.77	3.70	2.58
8	37.0	25.85	55.52	38.77	3.47	2.58
7	37.0	25.85	55.52	38.77	3.70	2.58
6	37.0	25.85	55.52	38.77	3.47	2.58
5	37.0	25.85	55.52	38.77	3.70	2.58
4	37.0	25.85	55.52	38.77	3.47	2.58
3	37.0	25.85	55.52	38.77	3.70	2.58
2	37.0	25.85	55.52	38.77	3.47	2.58
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

โดยการใส่แรงจะใส่ในแต่ละโหนดในทิศทาง Y ในแต่โหนดตามหลักการแรงกระทำเข้าด้านข้างของแต่ละชั้น

นำแรงใส่เข้าแต่ละโหนดตามที่สร้างโครงสร้างไว้ตั้งแต่เริ่มต้น เมื่อนำแรงใส่เข้าเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการอ่านผลจากโปรแกรม และทำการวิเคราะห์ต่อไป และ ทำการตรวจสอบในโปรแกรม SAP2000 โดยจะแสดงผลในบทที่ 4

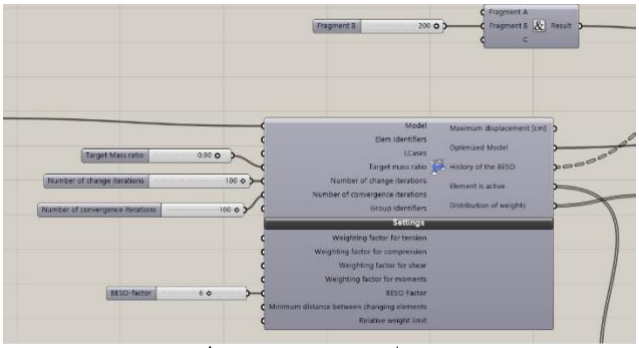
3.4 กำหนดข้อกำหนดในการปรับปรุงโครงสร้าง

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดค่าที่ใช้ในการคำนวณ BESO ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. Target mass ratio หรือ ปริมาตรของโครงสร้างที่นำมาใช้คำนวณในกระบวนการ BESO เพื่อทำการปรับปรุงโครงสร้าง ซึ่งจะคล้ายคลึงกับปริมาตรเป้าหมาย(V*) โดยในภาพ 3.4 จะแสดงในกรณีตั้งค่า Target mass ratio เป็น 0.9

2. BESO Factor เป็นฟังก์ชันในการไปคำนวณบอกปริมาตรชิ้นส่วนที่จะนำเอาออกในขั้นตอนการวนซ้ำ ซึ่งจะทำงานโดย ให้สมมุติว่าในการวนซ้ำครั้งนี้จะเอามวลออก n[kg] และตั้ง BESO Factor = m โปรแกรมจะทำการนำชิ้นส่วนมวล (m+1)n ออกจากโครงสร้าง แล้วจึงจำชิ้นส่วนมวล mn ที่ใส่กลับเข้ามาในโครงสร้างเพื่อให้สุดท้ายในตอนจบการวนซ้ำมวลจะหายไป (m+1)n – mn =n[kg] ฉะนั้นการเปลี่ยนค่านี้จะส่งผลต่อรูปร่างโครงสร้างสุดท้ายในการทำงาน ซึ่งจะคล้ายคลึงกับตัวแปร ER ในหลักการดังเดิมของ BESO โดยในภาพ 3.4 จะแสดงให้เห็นว่าทำการตั้ง BESO Factor ไว้ที่ 6

3. History of the BESO เป็นฟังก์ในการกำหนดเลขในการทำงานวนซ้ำปรับปรุงโครงสร้างของกระบวนการ BESO ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นเลข 200 ซึ่งแบบเป็น 100 จากการเพิ่มลดชิ้นส่วน (Number of change iterations) และอีก 100 เป็นการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเพื่อหารูปแบบที่ดีที่สุด (Number of convergence iterations) โดยในภาพ 3.13 จะแสดงให้เห็นว่าทำการตั้ง History of BESO เป็นเลข 200

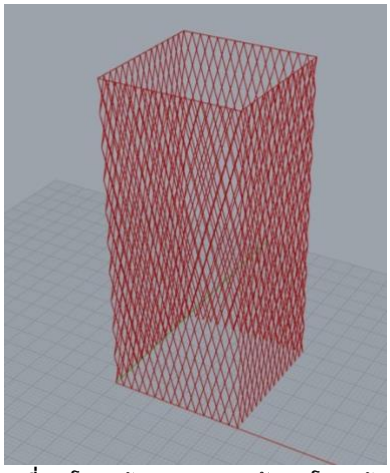


รูปที่ 3.4 2การกำหนดค่าที่ใช้คำนวณ BESO

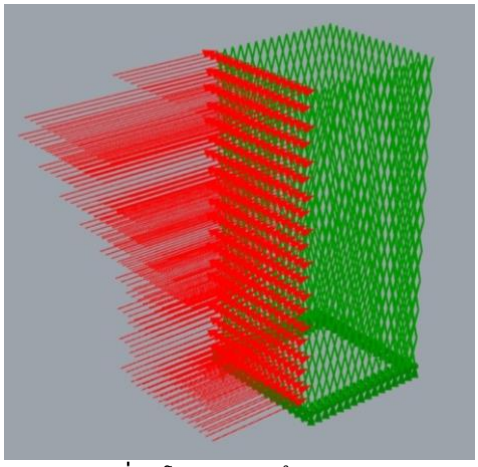
4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 โครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบ

จากการจำลองรูปแบบโครงถักแบบ Diagrid ทั้งหมดจำนวน 20 ชั้นซึ่งในตัวของมันสามารถรับทั้งน้ำหนักชิ้นส่วน และ แรงลม จากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมพบว่ามีจำนวนชิ้นทั้งหมด 2580 ชิ้น น้ำหนักโดยเริ่มเท่ากับ 293.58 ตัน



รูปที่4.1 โครงสร้างก่อนทำการปรับปรุงโครงสร้าง



รูปที่4.2 โครงสร้างขณะใส่แรงกระทำ

4.1.1 จำนวนชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบ

จำนวน โหนด	=	1260	โหนด
จำนวน ชิ้นส่วน	=	2580	ชิ้น

4.1.2 มิติของโครงสร้างที่ใช้ออกแบบ

ออกแบบเป็นโครงสร้าง	=	3	มิติ

4.1.3 ระยะห่างระหว่าง node ที่ใช้ออกแบบ

ระยะห่างในแนวแกน X	=	2.0	เมตร
ระยะห่างในแนวแกน Y	=	3.5	เมตร

4.1.4 น้ำหนักโครงสร้างที่ใช้ออกแบบ

น้ำหนักโครงสร้าง	=	293.58	ตัน
วัสดุ	=	S235 (Pipe Steel)	
	=	19 เซนติเมตร (Diameter)	
	=	0.7 เซนติเมตร (Thickness)	

4.1.5 Ground Structure

Ground Structure เป็นโครงถักแบบ Diagrid สามเหลี่ยมรอบล้อมตึกสี่เหลี่ยม

ขนาดของตึก	=	กว้างxยาวxสูง
	=	30x30x70 เมตร

4.1.6 Boundary Condition

Load Combination = 0.75 (1.7DL+2.0LL+2.0WL)

Support Condition = Pin support @ Base

Wind Load Combination = Y-Windward

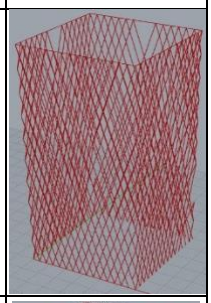
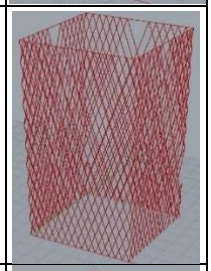
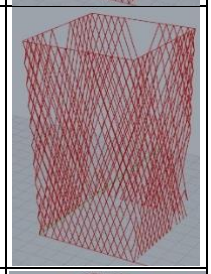
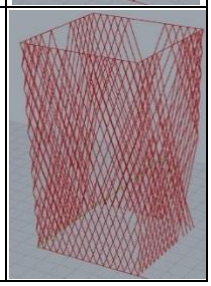
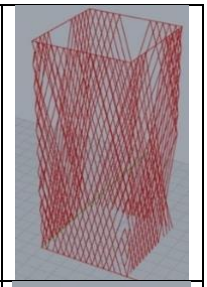
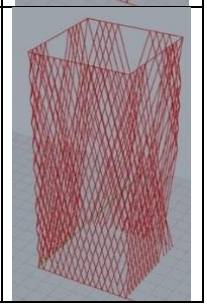
สถานที่ตั้ง = ตึกบริเวณกรุงเทพมหานคร เป็นพื้นที่ในตัวเมืองสิ่งกีดขวางเยอะ

4.2 การตั้งค่ากระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้าง

Target Mass ratio = 0.9, 0.8, 0.75

BESO-Factor = 2.0, 6.0

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่าง Target Mass ratio กับ BESO-Factor

Target mass ratio	BESO-Factor	Front	Right	Isometric
0.9	2.0			
0.9	6.0			
0.8	2.0			
0.8	6.0			
0.75	2.0			
0.75	6.0			

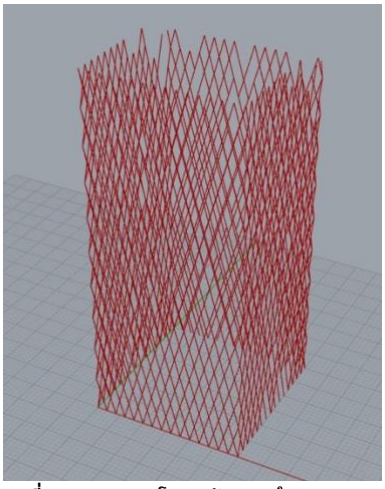
4.3 ผลของการปรับปรุงโครงสร้าง

ตารางที่ 4.2 จำนวนชิ้นของโครงสร้างและน้ำหนักคงเหลือของโครงสร้าง

Target Mass ratio	BESO-Factor	จำนวนชิ้นส่วนเหลือ	น้ำหนักโครงสร้าง(kg)
0.9	2.0	2219	271.31
0.9	6.0	2223	271.81
0.8	2.0	1979	241.61
0.8	6.0	1981	241.86
0.75	2.0	1859	226.75
0.75	6.0	1866	227.62

4.4 อภิปรายผลของการปรับปรุงโครงสร้าง

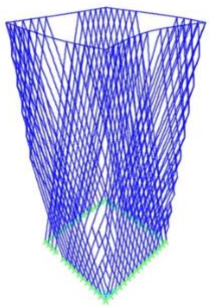
ผลการวิเคราะห์ : โครงสร้างที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมพบว่าบริเวณในด้านที่ตั้งฉากกับแรง จะมีชิ้นส่วนที่หายไปน้อยกว่าด้านที่ขนานกับแนวแรง เนื่องจากในด้านที่ขนานกับแนวแรงเกิดการรับแรงที่น้อยกว่าทางตั้งฉาก จึงทำให้เกิดการลดชิ้นส่วนในด้านขนานแนวแรงก่อนการลดชิ้นในหน้าที่รับแรงตั้งฉาก และในการเกิดการลดชิ้นส่วนแต่ละหน้าจะเกิดที่บริเวณด้านบนก่อนแล้วจึงเป็นกลางกับล่างเนื่องจากในบริเวณด้านบนทำการรับแรงลมที่น้อยกว่าบริเวณกลางและล่างที่ทำการรับแรงลมและรับแรงของตัวโครงสร้าง ทั้งนี้ค่า Target mass ratio กับ BESO Factor จะส่งผลกับรูปร่างและน้ำหนักสุดท้ายของโครงสร้าง โดยเมื่อทำการลดค่า Target mass ratio คือการลดปริมาตรน้ำหนักเหล็กที่นำมาคำนวณ BESO ซึ่งจะส่งผล ให้น้ำหนักและชิ้นส่วนหลังการปรับปรุงโครงสร้างลดลง และในค่า BESO-Factor คือค่าการลดเพิ่มปริมาตรชิ้นส่วนในการทำงานของ BESO ของ Karamba3D โดยเมื่อเพิ่มค่านี้ขึ้น จะส่งผลให้เกิดการลดและเพิ่มชิ้นส่วนในแต่ละการวนซ้ำมีจำนวนมากชิ้นขึ้นตาม ซึ่งไม่มีเลขตายตัวในการใช้งาน ทั้งนี้จะส่งผลกับรูปร่างและน้ำหนักสุดท้ายของโครงสร้างโดยมีแนวโน้มว่าเมื่อลดค่าลงจะทำให้ชิ้นส่วนและน้ำหนักของโครงสร้างลดลง



รูปที่4.3 ภาพแสดงโครงสร้างขณะใส่แรงกระทำ

4.5 อภิปรายผลจากการเปรียบเทียบกับโปรแกรม SAP2000

เมื่อได้โครงสร้างที่ได้จากการปรับปรุงโครงสร้างด้วย Karamba3D จึงได้นำโมเดลเข้าสู่โปรแกรม SAP2000 เพื่อทำการวิเคราะห์หน้าตัดและทำการตรวจสอบแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งพบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างและสามารถทำการออกแบบต่อไปได้โดยการดึงโหลดพื้นฐานต่าง ๆ เพื่อไปทำการออกแบบต่อไป แต่ในการวิเคราะห์โครงสร้างในโปรแกรม SAP2000 ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเป็นรูปแบบของ Frame ซึ่งแตกต่างจากการทำ Topology Optimization ในโปรแกรม Karamba3D เนื่องจากอ้างอิงการก่อสร้างโครงถักของจริง การทำให้โครงถักเป็นที่ช่วยรับโครงสร้างตึกเป็นพฤติกรรมแบบ Truss นั้นทำได้ยากจึงทำการวิเคราะห์แบบ Frame แทนเนื่องจากจะมีความแม่นยำกว่าเมื่อเทียบกับความเป็นจริง ในส่วนของเหตุผลว่าทำไมต้องใช้พฤติกรรมรูปแบบ Truss ในโปรแกรม Karamba3D เนื่องจากในการวิเคราะห์โครงสร้างของโปรแกรม SAP2000 ใช้การวิเคราะห์ 1 รอบแต่ใน Karamba3D ใช้การคำนวณหลายรอบมาก การลดการวิเคราะห์โมเมนต์ในแต่ละชิ้นส่วนจึงช่วยประหยัดเวลาในการทำไปได้ยากมาก โดยได้ผลการรับแรงในชิ้นส่วนดังภาพ 4.4 ซึ่งจะได้ผลจากโปรแกรมว่าตัวโครงสร้างที่ทำการปรังปรุงโครงสร้างมาสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นได้จากมาตรฐานความปลอดภัย



รูปที่4.4 แสดงผลการรับแรงที่ได้จากโปรแกรม SAP2000

5. สรุปผลงานวิจัย

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการออกแบบโทโพโลยีด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Topology optimization) ของโครงสร้างเหล็กถักประกอบผิวอาคาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์หาแนวทางการออกแบบโครงสร้างเหล็กถักประกอบผิวอาคารที่สามารถลดต้นทุนวัสดุและผลกระทบต่อส่งแวดล้อม ในขณะเดียวกันยังคงรักษาความสามารถในการรับแรงตามมาตรฐานการใช้งาน ผ่านการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Direct Stiffness Method ร่วมกับวิธีการ Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างเหล็กถัก ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่ทันสมัยได้แก่ (1) โปรแกรม Rhinoceros3D (2) โปรแกรม Grasshopper และ (3) ส่วนขยาย Karamba3D โดยปัญหาที่พบเจอในการทำโครงการครั้งนี้คือ การทำความเข้าใจคำสั่งต่าง ๆในการขึ้นรูปโครงสร้างในโปรแกรม Karamba3D ข้อจำกัดของโปรแกรมในการวิเคราะห์การตัดโครงสร้างด้วยวิธี BESO กับโครงสร้างชนิดเฟรมและชนิดอื่นๆ

การดำเนินการวิจัยจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือการปรับปรุงโครงสร้างโดยการใช้ BESO โดยการใช้โปรแกรมที่ได้กล่าวข้างต้นเพื่อทำการลดปริมาตรของโครงสร้างและเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ของ BESO และการนำผลที่ได้จากการปรับปรุงโครงสร้างเข้าสู่โปรแกรมวิเคราะห์ SAP2000 เพื่อทดสอบความสามารถรับแรง โดยในส่วนแรกจะได้ผลออกมาว่ารูปร่างโครงสร้างหลังการปรับปรุงและปริมาตรการลดชิ้นส่วนของโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับการตั้งค่าการนำข้อมูลไปคำนวณในการปรับปรุงโครงสร้างซึ่งสามารถตั้งได้จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ และในส่วนที่สองการนำไปโครงสร้างที่ได้จากการปรับปรุงโครงสร้างเข้าสู่โปรแกรมSAP2000 ซึ่งได้มีการเปลี่ยนรูปแบบของโครงสร้างจาก Truss เป็นในรูปแบบของ Frame เนื่องจากมีการคำนึงถึงในงานก่อสร้างจริง ซึ่งจะได้ผลจากโปรแกรม SAP2000 ว่าตัวโครงสร้างที่ได้จากการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธี BESO สามารถรับแรงตามมาตรฐานการใช้งานได้จริง

ผลจากการศึกษานี้ในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าการออกแบบโทโพโลยีด้วยวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดสามารถใช้ในการลดต้นทุนวัสดุของโครงสร้างเหล็กถักประกอบผิวอาคาร โดยยังคงรักษาความสามารถในการรับแรง ซึ่งเป็นแนวทางการก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมผ่านการลดปริมาตรทรัพยากรและการปล่อยคาร์บอนในงานก่อสร้าง

เอกสารอ้างอิง

[1] Rut Su, “Automatic image-based Sbfe approach for multiphase-materials topology optimization under dynamic loading”, M.A. thesis, Chulalongkorn university, 2022

[2] มยผ. 1311-50, 2550. มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร,กรมโยธาธิการและผังเมือง ,กระทรวงมหาดไทย

[3] Robert McNeel & Associates. Rhino3D. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.rhino3d.com. [10 พฤษภาคม 2567].

[4] Scott Davidson. Grasshopper. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.grasshopper3d.com. [10 พฤษภาคม 2567].

[5] Clemens Preisinger. KARAMBA3D 2.2.0. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://manual.karamba3d.com. [10 พฤษภาคม 2567].