

การวิเคราะห์ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด ของคานถ่ายแรงคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจาย Design of Reinforced Transfer Beam with Topology Optimization Method by a Spread-over Reinforcement Model

กนต์พิชญ์ ปัจจัย¹, ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รงค์² และ ศิรเดช สุริต^{3*}

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

^{2,3} อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: archsds@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้างคานถ่ายแรงคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ระเบียบวิธีแบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจาย ในการวิเคราะห์ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด กรณีศึกษาคืออาคารโรงพยาบาล สูง 12 ชั้น และมีชั้นใต้ดิน 1 ชั้น ซึ่งใช้ระบบเสาและกำแพงรับแรงเฉือนเป็นองค์ประกอบหลักในการรองรับแรงกระทำแนวตั้งและแนวราบ คานถ่ายแรงมีความยาวช่วงเท่ากับ 6.80 เมตร ลึก 1.70 เมตร มีลักษณะเป็นคานลึก และมีแรงกระทำเท่ากับ 351.9 ตัน โดยแรงกระทำจากเสาไม่อยู่กึ่งกลางคาน การวิเคราะห์ใช้กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างเชิงวิวัฒนาการ โดย MATLAB เพื่อค้นหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดด้านต้นทุนวัสดุ คือผลรวมของราคาคอนกรีตและเหล็กเสริม ผลการวิเคราะห์ พบว่า ทอพอโลยีในรอบการคำนวณที่ 36 มีราคารวมของคอนกรีตและเหล็กเสริม 188,050.91 บาท จากนั้น ทำการเปรียบเทียบกับคานที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318-19 ผลการวิจัยพบว่า การใช้ระเบียบวิธีดังกล่าวทำให้คานมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบจำลอง Strut-and-Tie ซึ่งสามารถลดปริมาณคอนกรีตได้ถึง 62.53% โดยที่ค่าการโก่งตัวและหน่วยแรงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด อันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้าง และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: คานถ่ายแรง, ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด, แบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจาย

Abstract

This research presents an analytical study aimed at optimizing the design efficiency of reinforced concrete transfer beams using a spread-over reinforcement modeling approach in topology optimization. The case study involves a 12-story hospital building with one basement level, where the primary load-bearing system consists of columns and shear walls supporting both vertical and lateral loads. The transfer beam has a span length of 6.80 meters, a depth of 1.70 meters, classifying it as a deep beam, and is subjected to a load of 351.9 tons with an eccentric column load. The analysis employs an evolutionary structural optimization process using MATLAB to determine the optimal shape under material cost constraints, considering the combined cost of concrete and reinforcement steel. The results indicate that in the 36th iteration, the

optimized topology yields a total material cost of 188,050.91 THB. This was then compared with a beam designed according to ACI 318-19 standards. The findings reveal that the proposed optimization approach produces a structural form closely resembling the Strut-and-Tie Model, leading to a 62.53% reduction in concrete volume while maintaining permissible deflection and stress levels. This approach enhances structural design efficiency while minimizing environmental impact.

Keywords: Transfer Beam, Topology Optimization, Spread-over Reinforcement Model

1. คำนำ

คานถ่ายแรง เป็นองค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญในอาคารสูงหรืออาคารที่มีการออกแบบสถาปัตยกรรมซับซ้อน ทำหน้าที่ถ่ายโอนน้ำหนักจากโครงสร้างด้านบน เช่น เสาหรือพื้น ไปยังโครงสร้างด้านล่างที่มีตำแหน่งไม่ตรงกัน เช่น เสาชั้นล่างหรือฐานราก อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างคานถ่ายแรงมักเผชิญกับปัญหาหลายประการ ทั้งในแง่เทคนิคและการจัดการ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย คุณภาพ และกำหนดการของโครงการก่อสร้าง

เนื่องจากคานถ่ายแรงต้องรับน้ำหนักมาก จึงต้องใช้เหล็กเสริมปริมาณสูงเพื่อต้านทานแรงดัด (Bending Moment) และแรงเฉือน (Shear Force) ซึ่งอาจทำให้เกิดความหนาแน่นของเหล็กเสริมจนยากต่อการเทคอนกรีตให้แน่นทั่วถึง ส่งผลให้เกิดโพรงอากาศหรือความแข็งแรงลดลง และขนาดที่ใหญ่และลึกของคาน ทำให้ปริมาณคอนกรีตที่ใช้มีน้ำหนักมากขณะเท จำเป็นต้องใช้โครงยันที่แข็งแรงเพื่อรองรับน้ำหนักนี้ในช่วงที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัว การยันที่ไม่เพียงพออาจทำให้โครงสร้างชั้นล่างเสียหาย [1]

การออกแบบโดยใช้วิธีการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด (Topology Optimization) คือกระบวนการวิเคราะห์เพื่อค้นหารูปร่างที่เหมาะสมของโครงสร้าง โดยเริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ เช่น แรงที่กระทำต่อชิ้นส่วน จุดรองรับ และคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละส่วน [2] กระบวนการนี้ใช้ Finite Element Method (FEM) ในการวิเคราะห์ เพื่อแสดงผลการกระจายความเค้นภายในชิ้นส่วน ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการรับแรงและตอบสนองต่อข้อกำหนดที่ตั้งไว้ได้อย่างเหมาะสม

กระบวนการเริ่มต้นการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เริ่มจากแบ่งโครงสร้างเป็นหน่วยย่อยด้วย Finite Element Method (FEM) เพื่อวิเคราะห์พลังงานความเครียดเสมือน (Virtual strain

energy) ในแต่ละหน่วย จากนั้นใช้เทคนิค Evolutionary Structural Optimization (ESO) เพื่อกำจัดหน่วยย่อยที่มีพลังงานความเครียดต่ำทีละขั้นตอน จนได้ topology ที่แสดงเส้นแรงอัด (struts) และเส้นแรงดึง (ties) ที่ชัดเจน ทำให้อยู่ในรูปของ Strut-and-Tie Model [3]

ผลลัพธ์จากการออกแบบโดยใช้วิธีการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด มักได้รูปทรงที่ซับซ้อนและไม่สม่ำเสมอ (organic shapes) ซึ่งอาจมีลักษณะไม่เรียบหรือมีส่วนที่บางเกินไป ส่งผลให้ยากต่อการรับแรงในบางจุดหรือเกิดจุดอ่อนในโครงสร้าง [4] เช่น คานอาจมีส่วนโค้งหรือช่องว่างที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยปรับแต่งรูปร่างของชิ้นส่วน เช่น การทำให้พื้นผิวมีความเรียบ, เพิ่มความหนาของชิ้นส่วนในจุดที่บางเกินไป และเพื่อลดความซับซ้อนของรูปทรง [5]

รูปร่างของชิ้นส่วนที่ได้รับการออกแบบโดยใช้วิธีการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด จะมีช่องว่างเกิดขึ้นภายในชิ้นส่วน ซึ่งส่งผลให้มีการลดน้ำหนักของชิ้นส่วนเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนก่อนการออกแบบ โดยยังคงความสามารถในการรับแรงได้ในระดับที่เทียบเท่ากับชิ้นส่วนเดิม นอกจากนี้ ช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพิ่มเติม เช่น การติดตั้งระบบต่าง ๆ โดยไม่เป็นอุปสรรคต่อการทำงานของชิ้นส่วน

ในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำจึงเลือกใช้การออกแบบคานถ่ายแรงโดยใช้วิธีการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด โดยเปรียบเทียบระหว่าง คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเนื้อเดียว ที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318-19 และคานคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบจากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด นำมาเปรียบเทียบคําค่าในการก่อสร้างในด้านต้นทุนวัสดุ เพื่อลดค่าก่อสร้างจากการใช้วัสดุภายในคานดังกล่าว อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากการผลิตซีเมนต์ ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากจากการเผาหินปูน และการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อให้ความร้อนในเตาเผา ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 7% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก [6]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีคานลึก

ตามมาตรฐาน ACI 318-19 คานลึกถูกกำหนดให้เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับน้ำหนักจากด้านหนึ่งและถ่ายโอนน้ำหนักไปยังจุดรองรับที่อยู่อีกด้านหนึ่ง ซึ่งส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการรับแรงอัดในลักษณะของเสาโค้ง (Compression Strut) ที่พัฒนาขึ้นระหว่างตำแหน่งที่รับน้ำหนักและจุดรองรับ คานที่มีพฤติกรรมเป็นคานลึกนี้มีข้อกำหนด ได้แก่ ความยาวช่วงว่างของคาน (Clear Span) ระหว่างจุดรองรับหนึ่งไปยังจุดรองรับอีกหนึ่งจะต้องไม่เกิน 4 เท่าของความลึกโดยรวมของคาน หรือในกรณีที่มีน้ำหนักกระจุก (Concentrated Load) กระทำ น้ำหนักดังกล่าวจะต้องอยู่ในระยะไม่เกิน 2 เท่าของความลึกของคานนับจากผิวหน้าของจุดรองรับ [7]

การเสริมเหล็กเสริมกระจายชั้นต่ำในคานลึก จะต้องพิจารณาเหล็กเสริม ดังนี้

$$A_v \geq 0.0025b_w s \quad (1)$$

$$A_{vh} \geq 0.0025b_w s_2 \quad (2)$$

เมื่อ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามแนวความยาวคาน, A_{vh} คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตั้งฉากความยาวคาน, s คือระยะห่างของการเสริมตั้งฉากความยาวคาน และ s_2 คือระยะห่างของการเสริมตามแนวความยาวคาน

การเสริมเหล็กชั้นต่ำของเหล็กเสริมรับแรงดัด จะต้องไม่น้อยกว่าการคำนวณดังสมการที่ (3) และสมการที่ (4)

$$A_s \geq \frac{0.25\sqrt{f_c'}}{f_y} b_w d \quad (3)$$

$$A_s \geq \frac{1.4}{f_y} b_w d \quad (4)$$

โดยที่ A_s หมายถึง พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมรับแรงดัด, f_c' หมายถึง ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต, f_y หมายถึง ค่ากำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม, b_w หมายถึง ความกว้างของคาน และ d คือ ความลึกประสิทธิภาพของคานถ่ายแรง

2.2 ทฤษฎี Strut and tie (STM)

Strut-and-Tie Model (STM) เป็นวิธีการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้จำลองพฤติกรรมการถ่ายแรงในชิ้นส่วนที่มีการไหลของความเค้นไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity Regions หรือ D-Regions) เช่น คานลึก (Deep Beams), ผนังรับแรงเฉือน (Shear Walls), หรือบริเวณจุดต่อ (Connections) วิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Schlaich และคณะ [8] ซึ่งเสนอแนวคิดการจำลองโครงสร้างด้วยองค์ประกอบ 3 ประเภท

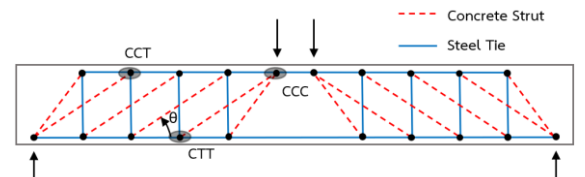
แนวคิดของวิธี STM ประกอบไปด้วย

1. Strut - ชิ้นส่วนรับแรงอัด
2. Ties - องค์ประกอบที่รับแรงดึง
3. Nodes - จุดที่ Strut และ Tie มาบรรจบกัน เพื่อถ่ายแรงระหว่างองค์ประกอบ

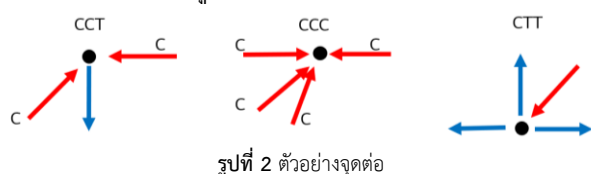
แนวคิดของวิธี STM ตาม ACI 318-19 [7] มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนด D-Region
2. สร้างโมเดล STM โดยทำการวาด Strut, Tie และ Node โดยอิงจากตำแหน่งน้ำหนักและจุดรองรับ
3. คำนวณแรงในองค์ประกอบ จากการใช้สมการสมดุล (Static Equilibrium) เพื่อหาแรงใน Strut และ Tie
4. ตรวจสอบความแข็งแรงของชิ้นส่วน Strut, Tie และ Node
5. ออกแบบเหล็กเสริม โดยการจัดวางชิ้นส่วน Tie ให้สอดคล้องกับแรงดึงที่คำนวณได้
6. ตรวจสอบรายละเอียด โดยคำนึงถึงระยะห่างและการยึดเกาะของเหล็กเสริม

แสดงตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนและจุดต่อ ในรูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 ตัวอย่างคาน 1 ช่วง



รูปที่ 2 ตัวอย่างจุดต่อ

2.3 การหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด เป็นวิธีการออกแบบโครงสร้างเชิงคำนวณที่มุ่งหาการกระจายวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในขอบเขตการออกแบบ (design domain) เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด เช่น น้ำหนัก ความแข็งแรง หรือการใช้ทรัพยากร [9]

การวิเคราะห์ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด โดยการใช้แบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจาย การคำนวณการกระจายแรงภายในโครงสร้างคอนกรีต เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโครงสร้างภายใต้ภาระที่กำหนดไว้อย่างเป็นระบบ จากนั้น ดำเนินการตรวจสอบส่วนประกอบของคอนกรีตที่มีการวิบัติ โดยพิจารณาทั้งการรับแรงอัด และแรงดึง ซึ่งเมื่อระบุบริเวณที่เกิดการวิบัติได้แล้ว จะดำเนินการเสริมเหล็ก โดยใช้ปริมาณเหล็กเสริมในระดับต่ำสุดที่เพียงพอต่อการป้องกันการวิบัติ ในขั้นตอนถัดไป ส่วนของคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพต่ำ เช่น บริเวณที่ไม่รับแรงหรือไม่มีความจำเป็นต่อโครงสร้าง จะถูกกำจัดออกเพื่อลดน้ำหนักและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของโครงสร้าง สุดท้าย กระบวนการนี้จะถูกดำเนินการซ้ำตั้งแต่การคำนวณการกระจายแรง การตรวจสอบการวิบัติ และการกำจัดส่วนที่ไม่จำเป็นอย่างต่อเนื่อง จนกว่าผลลัพธ์ที่ได้จะสอดคล้องกับเงื่อนไขการคำนวณที่กำหนดไว้อย่างครบถ้วนและสมบูรณ์ [10]

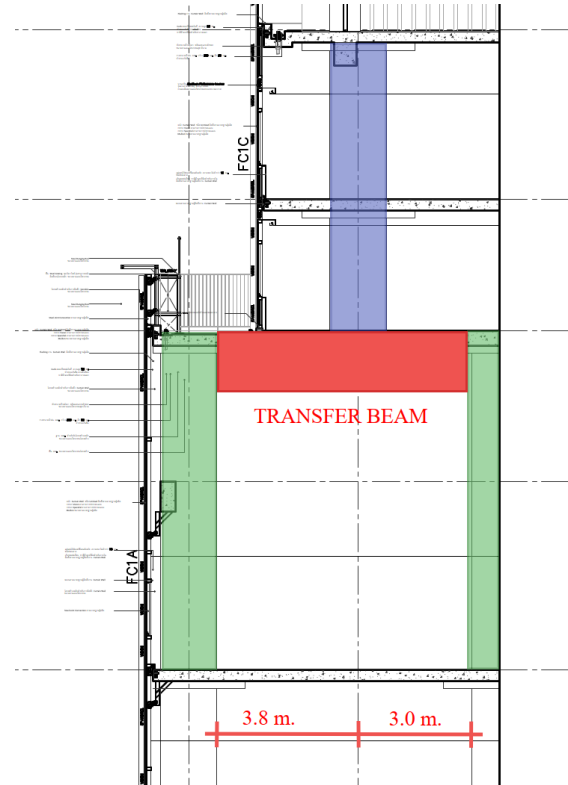
ในการออกแบบคานโดยการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดสอบพบว่าสามารถลดปริมาณคอนกรีตได้ร้อยละ 25 ถึง 30 [11,12,13] โดยยังคงคุณสมบัติการรับน้ำหนักตามมาตรฐาน

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 รายละเอียดอาคารที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้ ผู้จัดทำได้ศึกษาโดยใช้อาคารโรงพยาบาล ลักษณะเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก กว้าง 74.7 เมตร ยาว 66 เมตร สูง 12 ชั้น และมีชั้นใต้ดิน 1 ชั้น มีความสูงรวม 60 เมตร จากระดับอ้างอิง

จากรายละเอียดอาคาร พบว่าที่ชั้น 8 Grid line 5 มีตำแหน่งเสาที่ไม่ตรงกับด้านล่าง จึงทำให้ต้องมีคานถ่ายแรงระหว่างเสา Grid line ที่ 4 และ 6 ความยาวคานเท่ากับ 6.80 เมตร เพื่อรองรับเสาในตำแหน่ง Grid line ที่ 5 แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปตัดตำแหน่งคานถ่ายแรง

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การวิเคราะห์แรงกระทำต่อคานถ่ายแรง

จากรายละเอียดอาคารที่ใช้ในการศึกษา ผู้วิจัยจะทำการพิจารณาน้ำหนักในแรงดิ่งที่เกี่ยวข้อง ที่กระทำต่อคานถ่ายแรง ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load), น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เพิ่มเติม (Superimposed Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) โดยกำหนดให้การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจรรวม เป็นไปตามกฎกระทรวง กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ.2566 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา วันที่ 6 กันยายน 2566

3.2.2 การกำหนดคุณสมบัติของคานถ่ายแรง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการศึกษาคานถ่ายแรง โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. รูปร่างของคานถ่ายแรง - คานถ่ายแรงที่ทำการศึกษามีขนาดกว้าง 1.00 เมตร ลึก 1.70 เมตร โดยคานจะมีความยาวเท่ากับ 6.80 เมตร
2. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต - คานถ่ายแรงมีกำลังอัดคอนกรีต (f'_c) เท่ากับ 400 ksc (cylinder)
3. ประเภทของเหล็กเสริม - เหล็กเส้นกลม ใช้เหล็กชั้นคุณภาพ SR24 และเหล็กข้ออ้อย ใช้เหล็กชั้นคุณภาพ SD50

3.2.3 ออกแบบโครงสร้างคานถ่ายแรงตามมาตรฐาน ACI 318-19

จากรายละเอียดอาคารและคุณสมบัติของคานถ่ายแรงข้างต้น ผู้วิจัยจะนำข้อมูลมาออกแบบคานถ่ายแรงตามมาตรฐาน ACI 318-19 เพื่อหาปริมาณเหล็กเสริมภายในคานถ่ายแรง

3.2.4 การวิเคราะห์รูปทรงและหาปริมาณวัสดุของคานถ่ายแรง ด้วยวิธีการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด

ในการวิเคราะห์โดยวิธีการหาทอโพลีโอยที่เหมาะสมที่สุด ผู้จัดทำเลือกใช้แบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจาย [10] เพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมที่สุด โดยพัฒนากระบวนการดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบภาษาคอมพิวเตอร์ และนำไปประมวลผลผ่านโปรแกรม MATLAB version R2024b เพื่อวิเคราะห์และกำหนดรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง รวมถึงคำนวณปริมาณวัสดุที่ใช้ ได้แก่ ปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมเปรียบเทียบปริมาณวัสดุ

3.2.5 เปรียบเทียบปริมาณวัสดุ

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของคานถ่ายแรงแต่ละรูปแบบ ผู้จัดทำจะทำการเปรียบเทียบระหว่าง คานถ่ายแรงที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318-19 และคานถ่ายแรงคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากผ่านการหาทอโพลีโอยที่เหมาะสมที่สุด โดยจะทำการเปรียบเทียบปริมาณวัสดุที่ใช้ในคานถ่ายแรง ได้แก่ ปริมาณคอนกรีต และเหล็กเสริมของคานถ่ายแรงทั้ง 2 ประเภท เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุของคานถ่ายแรง

3.2.6 สรุปผล

ผู้วิจัยจะนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากข้อ 3.2.5 เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าของคานถ่ายแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ และหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด

4. ผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของคานถ่ายแรง เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักและปริมาณวัสดุ สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์แรงกระทำต่อคานถ่ายแรง

การวิเคราะห์คานถ่ายแรง พิจารณาแรงกระทำแบบจุด จากเสาที่ตั้งลงบนคานถ่ายแรงเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงแรงกระทำจากพื้นที่ชั้น 8 (ชั้นที่มีคานถ่ายแรง)

จากพื้นที่รับผิดชอบในการรับแรงของเสาที่กระทำต่อคานถ่ายแรง ที่ชั้น 9 และชั้น 10 มีพื้นที่รับแรงเท่ากันคือ 69.71 ตารางเมตร โดยสามารถคำนวณแรงกระทำแบบจุดลงบนคานถ่ายแรงจากเสาได้ดังนี้

4.1.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่

น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่สามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของเสา น้ำหนักของพื้น และน้ำหนักของวัสดุตกแต่งทางสถาปัตยกรรม โดยแสดงการพิจารณาแรงได้ดังนี้

1. ที่ชั้น 9 มีความหนาพื้นเท่ากับ 25 เซนติเมตร และเสาที่รับพื้นที่ชั้น 9 มีความกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 150 เซนติเมตร สูง 3.5 เมตร โดยกำหนดให้พื้นที่รับวัสดุตกแต่งเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดนรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดเท่ากับ 72,526 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 72.53 ตัน
2. ที่ชั้น 10 มีความหนาพื้นเท่ากับ 30 เซนติเมตร และเสาที่รับพื้นที่ชั้น 10 มีความกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 150 เซนติเมตร สูง 4.5 เมตร โดยกำหนดให้พื้นที่รับวัสดุตกแต่งเท่ากับ 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดนรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดเท่ากับ 68,749 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 68.75 ตัน

จากข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า คานถ่ายแรงรับน้ำหนักบรรทุกคงที่กระทำแบบจุดจากเสา เท่ากับ 141.28 ตัน

4.1.2 น้ำหนักบรรทุกจร

บริเวณชั้น 9 พื้นที่การรับน้ำหนักของเสาบริเวณดังกล่าว เป็นห้องพักผู้อาศัยรวม และบริเวณชั้น 10 เป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งงานระบบ

โดยกฎกระทรวง กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ.2566 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา วันที่ 6 กันยายน 2566 ระบุพื้นที่ห้องพักผู้ช่วยรวม ให้ใช้น้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

บริเวณชั้น 10 เนื่องจากเป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งงานระบบ น้ำหนักบรรทุกจรจึงขึ้นอยู่กับน้ำหนักของเครื่องจักรเป็นหลัก โดยกำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจรรวมเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

สามารถคำนวณน้ำหนักบรรทุกจรจนได้ดังนี้

1. ที่ชั้น 9 มีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำต่อเสาเท่ากับ 20,913 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 20.91 ตัน
2. ที่ชั้น 10 มีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำต่อเสาเท่ากับ 69,712 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 69.71 ตัน

จากข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า คานถ่ายแรงรับน้ำหนักบรรทุกจรกระทำแบบจุดจากเสา เท่ากับ 90.62 ตัน

4.1.3 น้ำหนักบรรทุกรวม

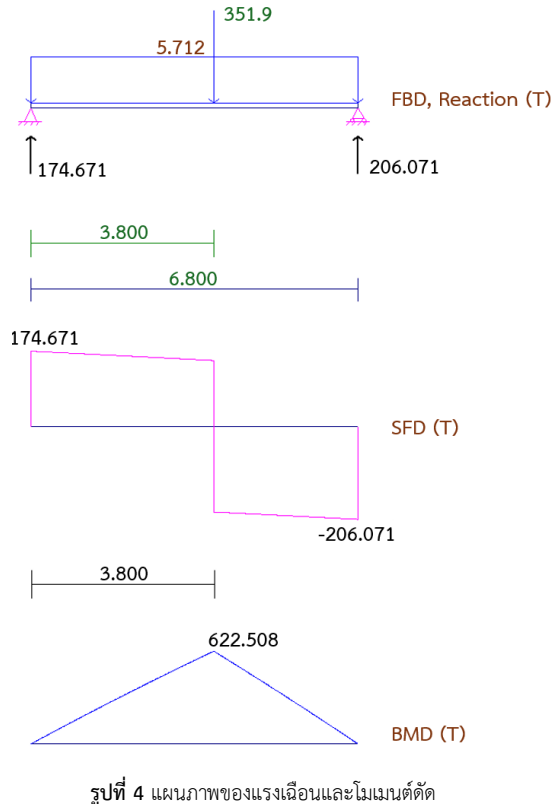
จากกฎกระทรวง กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ.2566 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา วันที่ 6 กันยายน 2566 ระบุน้ำหนักบรรทุกรวมจากในแรงในแนวดิ่ง เพื่อออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไว้เท่ากับผลรวมของ 1.4 เท่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่ และ 1.7 เท่าของน้ำหนักบรรทุกจร

ดังนั้น จากหัวข้อ 4.1.1 และ 4.2.2 จะได้น้ำหนักบรรทุกรวมกระทำแบบจุดลงบนคานถ่ายแรงเท่ากับ 351.9 ตัน

4.2 การวิเคราะห์รายละเอียดของคานถ่ายแรง

4.2.1 รายละเอียดคานถ่ายแรงตามมาตรฐาน ACI 318-19

จากการพิจารณาแรงตามข้อ 4.1.2 สามารถนำมาเขียนแผนภาพของแรงเฉือน (Shearing Force Diagram ; S.F.D.) และโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram ; B.M.D.) โดยกำหนดให้จุดต่อของคานอยู่ในรูปแบบ pinned-roller เนื่องจากพฤติกรรมการถ่ายแรงของคานลึกลงอยู่ในรูปแบบ Strut-and-tie จุดรองรับจึงไม่เกิดโมเมนต์ดัด สามารถพิจารณารูปแบบของคาน และแรงกระทำต่อคานถ่ายแรง (รวมน้ำหนักคงที่ของคาน) ได้ดังรูปที่ 4



ในการพิจารณาเหล็กเสริมหลักที่ต้องการ สามารถหาได้ดังสมการที่ (5)

$$A_s = \frac{M_u}{\phi f_y j d} \quad (5)$$

โดยที่ A_s หมายถึง ปริมาณเหล็กเสริมหลัก, M_u หมายถึง โมเมนต์ดัดประลัยที่หน้าตัดคานวิกฤต, ϕ คือ 0.9, f_y คือ ค่ากำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม และ $j d$ คือ ความยาวแขนของโมเมนต์ดัด

จากการพิจารณาร่วมกับปริมาณเหล็กเสริมหลักขั้นต่ำ พบว่า เหล็กเสริมหลักที่ต้องการในการรับโมเมนต์ดัด เท่ากับ 0.00598 เท่าของพื้นที่หน้าตัดคาน ดังนั้น เหล็กเสริมหลักจึงเท่ากับ $(0.00598)(100 \text{ cm}^2)(170 \text{ cm}^2) = 101.745 \text{ cm}^2$

การออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 6

$$\left[\frac{A_v}{s} \left(\frac{1 + \frac{l_n}{d}}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_2} \left(\frac{11 - \frac{l_n}{d}}{12} \right) \right] = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi f_y d} \quad (6)$$

โดยที่ A_v หมายถึง ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง, A_{vh} หมายถึง ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน, s หมายถึง ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง, s_2 หมายถึง ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน, l_n คือ ความยาวคาน, d คือ ความลึกประสิทธิภาพของคาน, V_u คือ แรงเฉือนประลัยที่หน้าตัดคานวิกฤต, V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคาน และ ϕ คือ 0.85

จากการพิจารณาร่วมกับปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอนขั้นต่ำ พบว่า ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้งที่ใช้ในการรับแรงเฉือนวิกฤตที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคาน เท่ากับ 4.02 cm^2 ที่ระยะเรียงไม่เกิน 25 cm และปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอนที่ใช้ในการรับแรงเฉือนวิกฤตที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคาน เท่ากับ 6.28 cm^2 ที่ระยะเรียงไม่เกิน 25 cm

สามารถสรุปปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณวัสดุของคานถ่ายแรงตามมาตรฐาน ACI 318-19

วัสดุ	พื้นที่ (m ²)	ความยาว (m)	ปริมาตร (m ³)
คอนกรีต	1.7	6.80	11.56
เหล็กเสริมหลัก	0.0102	6.80	0.0694
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวตั้ง	$0.000402 \times (6.8/0.25)$	5.20	0.0569
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอน	$0.000602 \times (1.7/0.25)$	6.80	0.0278

4.2.2 รายละเอียดคานถ่ายแรงจากการทำทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด

ผู้จัดทำ ได้ทำการพิจารณาการทำทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด ด้วยชุดคำสั่ง MATLAB version R2024b [10] โดยพิจารณาคานถ่ายแรงข้างต้น ดังรูปที่ 5 โดยมีการพัฒนาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดของคอนกรีตและเหล็กเสริม ดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 9

```
function RCTopopt(Lx,Ly,nlx,nly,FP,FC,Te,ChkSteel)
clc;
fname = sprintf('003 [T Ng] [LxLyVxVd]-[NXXNXXVd]-FPMd-FCMd', [Te Lx Ly nly nly FP FC]);
fidr = strcat('c:\model\',fname);
if exist(fidr,'dir') == 0;
mkdir(fidr)
end
DX = Lx/nlx;
DY = Ly/nly;
AE = DX*DY;
disp('Topology Optimization for Reinforced Concrete Structure');
nodes = (nlx+1)*(nly+1);
elems = nlx*nly;
XY = Nodes(nlx,nly,DX,DY);
NOC = FEM(nlx,nly);
Econ = 4270*(2.4^1.5)*(FC)^0.5; % From EIT
ESte = 2.0E06;
TotalThick = Te;
CstMax = FC;
Fy = 5000;
TstMax = 1.78*sqrt(CstMax); % Max Tensile Strength
FyMax = 0.6*Fy; % Allowable stress in steel tension and compression
HPC = zeros(elems,7);
% [E NU TH PL OT GA SP]
HPC(1:elems,1) = Econ; HPC(1:elems,2) = 0.17; HPC(1:elems,3) = TotalThick;
HPC(1:elems,4) = 0; HPC(1:elems,5) = 0;
HPC(1:elems,6) = 0; HPC(1:elems,7) = 1;
HPS = zeros(elems,7);
% [E NU TH PL OT GA SP]
HPS(1:elems,1) = ESte; HPS(1:elems,2) = 0.3; HPS(1:elems,3) = 0;
HPS(1:elems,4) = 0; HPS(1:elems,5) = 0;
HPS(1:elems,6) = 0; HPS(1:elems,7) = 1;
KG = KGlobal(nlx,nly,XY,NOC,HPC);
F = zeros(2*nodes,1);
F(2:2:2*nodes,1) = (Lx/nlx)*(Ly/nly)*Te % Dead load
F((round(((nlx+1)*(nly+1))-((300/Lx)*nlx)),0)*2,1) = -FP; % 300 is distance between point load and right support
FixedDofs = [1 2*(nlx+2)];
UB = FEM(nlx,nly,KG,F,FixedDofs);
ST = StressMatrix(elems,NOC,XY,UB,0,0,HPC);
STS = StressMatrix(elems,NOC,XY,UB,0,0,HPS);
US = 10*UB;
RM = 0.01;
LoopCount = 1;
EPS = 0.1;
MaxLoop = 150;
VConc(LoopCount) = sum(AE*HPC(:,3));
VSteel(LoopCount) = sum(AE*HPS(:,3));
ProcessPlot(ST,STS,HPC,HPS,VConc,VSteel,RM,nlx,nly,Te,AE,Te);
disp('Start Topology Optimization');
```

รูปที่ 5 ชุดคำสั่งการทำทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด ด้วย MATLAB

ในการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุและข้อมูลของตัวอย่างการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ

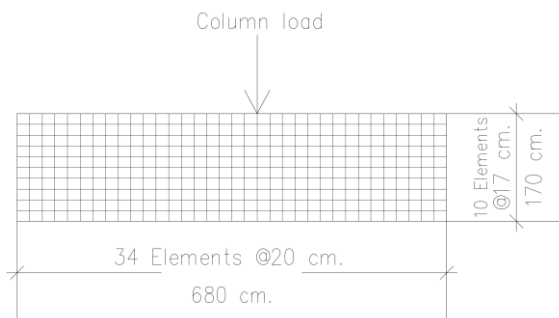
คุณสมบัติของวัสดุ	คอนกรีต	เหล็กเสริม
Elastic Modulus	302,000 ksc	2,040,000 ksc
กำลังรับแรงอัด	400 ksc	3,000 ksc
กำลังรับแรงดึง	35.2 ksc	3,000 ksc

Poisson's ratio	0.17	0.3
-----------------	------	-----

ตารางที่ 3 ข้อมูลของตัวอย่างทดสอบ

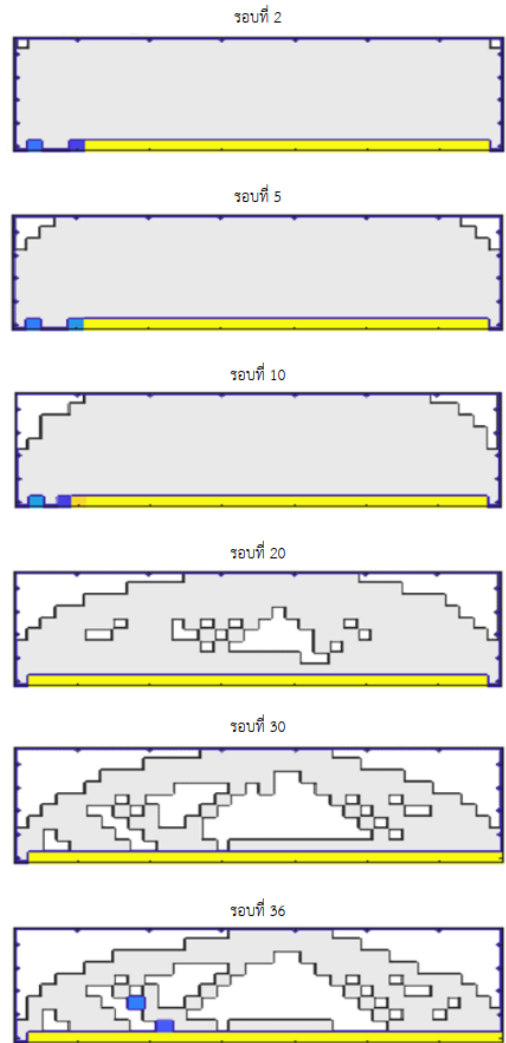
ข้อมูลตัวอย่าง		
ความยาวช่วง		6.8 m.
ความลึก		1.7 m.
ความหนา		1.0 m.
การแบ่งชิ้นส่วน	แกน x	34 ชิ้นส่วน
	แกน y	10 ชิ้นส่วน

แสดงการแบ่งชิ้นส่วน ดังรูปที่ 6

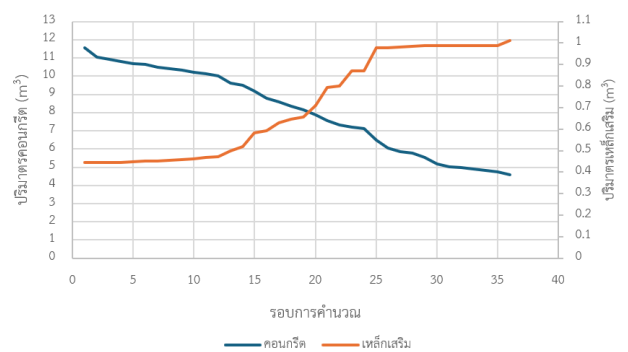


รูปที่ 6 การแบ่งชิ้นส่วนสำหรับการวิเคราะห์ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด

จากการวิเคราะห์ผล สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 ถึง 8



รูปที่ 7 การพัฒนาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดของคอนกรีตเสริมเหล็ก
รอบที่ 1, 5, 10, 20, 30 และ 36



รูปที่ 8 ปริมาตรคอนกรีตและเหล็กเสริมเทียบกับรอบการคำนวณ

จากผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ผู้จัดทำได้ใช้รอบการวิเคราะห์ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในรอบที่ 36 สามารถสรุปปริมาณวัสดุได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณวัสดุของคานถ่ายแรงจากการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด

วัสดุ	ปริมาตร (ม ³)
คอนกรีต	4.565
เหล็กเสริม	1.011

4.3 การวิเคราะห์น้ำหนักโครงสร้างและราคาวัสดุ

น้ำหนักของโครงสร้าง แสดงดังตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 น้ำหนักของคานถ่ายแรงตามมาตรฐาน ACI 318-19

วัสดุ	ปริมาตร (ม ³)	น้ำหนักต่อปริมาตร (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	น้ำหนัก (ตัน)
คอนกรีต	11.56	2.4	27.744
เหล็กเสริม	0.154	7.85	1.209
รวม			28.953

ตารางที่ 6 น้ำหนักของคานถ่ายแรงจากการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด

วัสดุ	ปริมาตร (ม ³)	น้ำหนักต่อปริมาตร (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	น้ำหนัก (ตัน)
คอนกรีต	4.565	2.4	10.956
เหล็กเสริม	1.011	7.85	7.936
รวม			18.892

ราคาวัสดุ อ้างอิงจากราคากลางวัสดุก่อสร้าง ปี 2568 [14] และอ้างอิงจากผู้ขาย [15] โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ราคาวัสดุ

วัสดุ	ราคา
คอนกรีต	3,200 บาทต่อลูกบาศก์เมตร
เหล็กเสริม	21,850 บาทต่อตัน

ดังนั้น สามารถคำนวณราคาวัสดุของคานถ่ายแรงตามมาตรฐาน ACI 318-19 และคานถ่ายแรงจากการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด ได้ดังตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 ราคาวัสดุของคานถ่ายแรงตามมาตรฐาน ACI 318-19

วัสดุ	ปริมาตร (ม ³)	ราคา
คอนกรีต	11.56	36,992
เหล็กเสริม	0.154	26,414
รวม		63,406

ตารางที่ 9 ราคาวัสดุของคานถ่ายแรงจากการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด

วัสดุ	ปริมาตร (ม ³)	ราคา
คอนกรีต	4.565	14,608
เหล็กเสริม	1.011	173,409
รวม		188,017

5. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบโครงสร้างคานถ่ายแรงคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ระเบียบวิธีแบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจาย โดยเปรียบเทียบกับคานถ่าย

แรงคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ออกแบบโดยมาตรฐาน ACI-318-19 ภายใต้ข้อจำกัดด้านต้นทุนวัสดุ คือผลรวมของราคาคอนกรีตและเหล็กเสริม และน้ำหนักของโครงสร้างคานถ่ายแรง จากการทดสอบพบว่า

1. รูปแบบของคานถ่ายแรงจากการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด สามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างได้ถึงร้อยละ 34.75 เมื่อเทียบกับปริมาณของคอนกรีต พบว่า สามารถลดปริมาณของคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 60.51
2. ปริมาณของเหล็กเสริมของคานถ่ายแรงจากการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด เท่ากับ 22.15 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรรวม เมื่อเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยมาตรฐาน ACI 318-19 ที่เหล็กเสริมเท่ากับ 1.332 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรรวม ทำให้เหล็กเสริมของคานถ่ายแรงจากการหาทอพอโลยีเหมาะสมที่สุด มีปริมาณมากกว่า 6.56 เท่า เมื่อเทียบกับเหล็กเสริมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยมาตรฐาน ACI 318-19 ส่งผลให้ราคาวัสดุของคานถ่ายแรงจากการหาทอพอโลยีเหมาะสมที่สุด สูงกว่าราคาวัสดุของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยมาตรฐาน ACI 318-19 อยู่ 2.97 เท่า

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า วิเคราะห์ทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด ของคานถ่ายแรงคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการใช้แบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจายการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด จะแสดงถึงปริมาณคอนกรีต และเหล็กเสริมรับแรงดึงที่เปลี่ยนไปในแต่ละรอบการคำนวณ โดยปริมาณเหล็กเสริมที่ได้จากการวิเคราะห์ เป็นปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการในการรับแรงดึง โดยมีได้อ้างอิงข้อจำกัดต่าง ๆ ในการออกแบบ เช่น ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำหรือปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดตามมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งจะได้นำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการออกแบบขั้นต่อไป

6. ข้อจำกัด

1. เนื่องจากการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด โดยการใช้แบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจาย ไม่สามารถปรับรูปแบบการก่อสร้างให้ตรงกับความเป็นจริง เป็นเพียงการคำนวณปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ต้องการในชิ้นส่วน ทำให้ผลที่ออกมาอาจไม่สอดคล้องกับการเสริมเหล็กจริง โดยในขั้นตอนต่อไปจะต้องนำรูปแบบของคานที่ได้จากการหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด เข้าสู่กระบวนการปรับรูปแบบเพิ่มเติม เพื่อให้สอดคล้องกับการก่อสร้าง และสอดคล้องกับรูปแบบทางสถาปัตยกรรมมากขึ้น
2. ในการศึกษาครั้งนี้ ยังไม่ได้คำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้าง เช่น การพิจารณาปริมาณไม้แบบ, การพิจารณานั่งร้านในการก่อสร้าง, ค่าแรง, ระยะเวลาในการก่อสร้าง เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลต่อปริมาณวัสดุ และค่าก่อสร้างในทางอ้อม
3. จากการวิเคราะห์หารายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยมาตรฐาน ACI 318-19 ได้พิจารณาถึงน้ำหนักบรรทุกคงที่ของคาน แต่การหาทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด โดยการใช้แบบจำลองโครงสร้างเสริมแรงแบบกระจาย มีได้คำนึงถึงน้ำหนักบรรทุกคงที่ของคานถ่ายแรง ทำให้ผลการวิเคราะห์อาจมีความคลาดเคลื่อนกับความเป็นจริง แต่อาจไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกรวมกระทำแบบจุดที่พิจารณาในการออกแบบคานถ่ายแรง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริเดช สุจริต ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาหลักของการจัดทำวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ช่วยให้คำปรึกษาทั้งด้านการเขียนรายงานและการใช้โปรแกรมในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รงค์ ที่ให้คำปรึกษาเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณคุณครู และอาจารย์ทุกท่าน ตั้งแต่ข้าพเจ้าได้เรียนมาจนถึงปัจจุบัน ผู้ที่ทำให้ข้าพเจ้าได้มีความรู้ในการดำรงชีวิต และนำความรู้ต่าง ๆ ให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสในการพัฒนาตนเองได้ จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ได้ในวันนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ใช้ตัวอย่างอาคารในการศึกษา งานวิจัยนี้ ทำให้เกิดวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นมา

ขอขอบคุณนายกิตติศักดิ์ ปัจจัย ผู้เป็นบิดา และนางกรรมภา ปัจจัย ผู้เป็นมารดา ผู้ที่กำเนิดแก่ข้าพเจ้าทั้ง 2 ท่าน ได้เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี ได้ให้โอกาสในการใช้ชีวิตแก่ข้าพเจ้า สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณนายกิตติศักดิ์ ปัจจัย ผู้เป็นพี่ชาย ที่เป็นต้นอย่างในการเติบโตและผลักดันข้าพเจ้าให้โตมาอย่างมีคุณภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sadouki, A., and Djafar-Henni, I. (2024). "Structural Response of Transfer Beams: Evaluating the Effect of Staged Construction." *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(9), 55–63.
- [2] Bendsoe, M. P., and Sigmund, O. (2003). *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*.
- [3] Liang, Q. Q., Xie, Y. M., and Steven, G. P. (2000). Topology Optimization of Strut-and-Tie Models in Reinforced Concrete Structures Using an Evolutionary Procedure. *ACI Structural Journal*, 97(2), 322-330.
- [4] Rozvany, G. I. N. (2009). "A critical review of established methods of structural topology optimization." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 37(3), 217-237.
- [5] Sigmund, O. (2001). "A 99 line topology optimization code written in Matlab." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21(2), 120-127.
- [6] Miller, S. A., Horvath, A., and Monteiro, P. J. M. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.006>
- [7] American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. Farmington Hills, MI: ACI.
- [8] Schlaich, J., Schäfer, K., & Jennewein, M. (1987). Toward a Consistent Design of Structural Concrete. *PCI Journal*, 32(3), 74-150. <https://doi.org/10.15554/pci.05011987.74.150>
- [9] Huang, X., & Xie, Y. M. (2023). "Recent Advances in Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) for Topology Optimization of Continuum Structures." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 66(4), 85-102.
- [10] Surit, S. (2011). *Topology Optimization for Concrete-Steel Composite Beams*. Ph.D. Dissertation, Kasetsart University, Thailand.
- [11] Jewett, J. L., and Carstensen, J. V. (2019). Topology-optimized design, construction and experimental evaluation of concrete beams. *Automation in Construction*, 102, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.001>
- [12] Yang, D., Liu, H., and Yang, J. (2020). "Topology optimization of reinforced concrete beams considering strength and ductility." *Engineering Structures*, 223, 111171. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111171>
- [13] Surit, S., Thanadirek, T., and et al. (2022). Topology optimization-based reinforced concrete beams: Design and experiment. *Journal of Structural Engineering*, 148(10), 04022145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003456](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003456)
- [14] กลุ่มออกแบบและก่อสร้าง, สำนักอำนวยการ, สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน. (2568). *บัญชีราคาค่าวัสดุ ก่อสร้างและค่าแรงงาน ปีงบประมาณ 2568*. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน.
- [15] Builk. "คอนกรีตผสมเสร็จ ORC คอนกรีต." เข้าถึงเมื่อ 30 มีนาคม 2568. <https://www.builk.com/yello/product/คอนกรีตผสมเสร็จ-orc-คอนกรีต-9/>.