

การลดจำนวนให้น้อยที่สุดของเศษที่เหลือจากการตัดเหล็กเสริมในการก่อสร้างอาคาร Cutting waste minimization of reinforced bars in building construction

เจตณัฐ ประภพรัตนกุล¹, ชญานนท์ พรเจริญ^{2*}, ภูริเดช ศิลป์ไพบุลย์พานิช³ และ เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์⁴

^{1,2,3,4}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ. กรุงเทพฯ 10330

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกระบวนการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการระบุตำแหน่งจุดต่อทาบของเหล็กเสริมภายในเสา เพื่อให้เหลือเศษจากการตัดเหล็กเสริมน้อยที่สุดในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ขั้นตอนการดำเนินการแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ การสร้างแบบจำลองโครงสร้างสามมิติโดยใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อให้ได้ข้อมูลความสูงเสา ขนาด และปริมาณของเหล็กเสริม จากนั้นจึงนำข้อมูลมาประมวลผลด้วยการกำหนดสมการที่อธิบายจำนวนของเศษเหล็กเสริมที่เหลือจากการตัด โดยการกำหนดพิกัดและระยะทาบเหล็กเสริมภายในเสา ตามมาตรฐาน ACI318-19 และ มยผ. 1103-52 ขั้นตอนสุดท้ายทำการหาค่าตำแหน่งจุดต่อทาบที่ทำให้เหลือเศษเหล็กเสริมจากการตัดให้น้อยที่สุด และนำข้อมูลออกมาเป็นรายละเอียดแบบก่อสร้างในการกำหนดจุดต่อทาบภายในเสา และรูปแบบการตัดเหล็กเสริมที่ทำให้เหลือเศษน้อยที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากกรณีศึกษาอาคาร 6 ชั้นสามารถลดเศษเหล็กเสริมจากการปรับเปลี่ยนจุดต่อทาบภายในเสาได้ 2,123.520 กิโลกรัมเมื่อเทียบกับการไม่พิจารณาการปรับเปลี่ยนจุดต่อทาบ 10,465.920 ซึ่งสามารถลดปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในเสาทั้งหมดได้ 20.29%

คำสำคัญ: แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, เหล็กเสริม, การหาค่าเหมาะสมที่สุด, การลดปริมาณเศษเหล็กเสริมจากการตัด, รูปแบบการตัดเชิงเส้นที่เหมาะสมที่สุด

Abstract

This paper presents the optimization design process for finding the optimal lapping position of reinforced bars within building columns which minimizes waste from the cutting process. The procedure is divided into 3 parts: Firstly, creating a 3D structural model using Building Information Modeling (BIM) to obtain the data of column height, size, and quantity of steel reinforcement. Second, processing the data from the 3D model to formulate the cutting waste's function based on allowable lapping locations and lapping lengths according to ACI 318-19 and DPT 1103-52 standards. Lastly, finding the lapping location that minimizes the cutting waste's function and return the details of

the construction drawing including the location and optimal cutting pattern. The result from the case study of a 6-story building represents that the scrap of reinforced bars in the column structure is reduced by 2,123.520 kilograms compared to the other method that not considering the lapping position 10,465.920 kilograms which can reduce the total amount of steel reinforcement in the columns 20.29%.

Keywords: Building Information Modeling, Reinforced bars, Optimal lapping position, Minimizes the cutting waste's function, Optimal cutting pattern

1. คำนำ

จากงานก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีเศษเหล็กคงเหลือจากการตัดเหล็กเส้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งตามท้องตลาดนั้นจะมีขนาดที่เฉพาะคือ 8 เมตร, 10 เมตร และ 12 เมตร เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ความยาวตามแบบก่อสร้างระบุจึงต้องมีการตัด ต่อ ทาบ หรือ เชื่อม เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดเศษเหลือจากการตัด โดยทั่วไปการกำจัดเศษเหล็กเหล่านี้จะทำได้โดยการหลอม เนื่องจากเศษเหล็กเป็นวัสดุพิษหมุนเวียนจึงสามารถนำมาหลอมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กและเหล็กกล้าได้ แต่วิธีการดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อในหลาย ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านเศรษฐกิจ หรือแม้กระทั่งด้านสิ่งแวดล้อม ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอย่างรุนแรงหรือภาวะโลกร้อน [1] งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการลดปริมาณเศษเหล็กโดยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบวิธีการจัดกลุ่มของเหล็กแต่ละขนาดตามที่ต้องการซึ่งมีขายตามท้องตลาด และหาช่วงของตำแหน่งที่จะทำการต่อทาบ เพื่อให้เศษเหลือของเหล็กในงานก่อสร้างมีปริมาณที่น้อยที่สุด

ในโครงการก่อสร้าง วิศวกรจะต้องคำนึงถึงการใช้วัสดุและทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยมูลค่าของเหล็กเป็นมูลค่าต้นทุนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในการก่อสร้าง เนื่องจากเหล็กเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างซึ่งมีราคาที่สูง ดังนั้นการลดปริมาณเหล็กที่ใช้ลงด้วยการลดปริมาณเศษเหล็กที่เกิดขึ้นจะทำให้ประหยัดค่าวัสดุอุปกรณ์ และประหยัดต้นทุนก่อสร้างจากค่าใช้จ่ายในการต่อทาบเหล็ก นอกจากนี้เมื่อเศษเหล็กลดลงจึงส่งผลให้ไม่เสียพื้นที่ในการกองเก็บเศษเหล็กเหลือใช้ โดยเศษเหล็กที่เหลือจากการใช้งานเมื่อ

เสื่อมสภาพลงแล้วจะส่งผลให้เป็นเศษเหล็กเหลือใช้ที่รอกการทิ้งเป็นจำนวนมาก เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ และก่อให้เกิดของเสียอันตราย [1]

ดังนั้นบทความนี้ได้มีการนำเสนอวิธีการดำเนินการเพื่อหาตำแหน่งจุดต่อทาบที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเสริมในงานก่อสร้างให้เหลือน้อยที่สุด โดยพิจารณาการลดปริมาณเศษเหล็กเสริมภายในเสาในงานโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทหล่อในที่ ซึ่งเป็นงานโครงสร้างที่มีเศษเหล็กมากกว่างานโครงสร้างประเภทอื่น โดยกลุ่มตัวอย่างคืองานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 6 ชั้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาก่อนแก้ไขปัญหาคัดแบ่งพัสดุนั้นมีมติด้วยกำหนดการเชิงเส้น [2] ในอุตสาหกรรมไม้เพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างจริงซึ่งสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้ 30.7% เมื่อเทียบกับการตัดตามแบบปกติ โดยการศึกษาที่ใช้แนวทางเชิงรูปแบบ (pattern oriented formulation) ในการกำหนดแบบจำลองการตัดแบ่ง (cutting stock model) โดยแบบจำลองที่ได้นั้นเป็นโปรแกรมเชิงเส้นที่จำกัดด้วยรูปแบบการตัดแบ่งจำนวนมาก และรูปแบบการตัดแบ่งนั้นหาโดยการใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นโดยเขียนด้วยภาษา Visual basic ปัญหาการตัดแบ่งพัสดุนั้นมีแบบจำลองในรูปแบบการวัดอุปสงค์ดังนี้

$$\text{Minimize} \sum_{j=1}^n X_j \quad (1)$$

$$\text{สมการเงื่อนไข} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} l_i \leq L \quad (3)$$

$$a_{ij} \geq 0, a \in \text{int eger} \quad (4)$$

$$X_j \geq 0, X_j \in \text{int eger}, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

โดย L คือ ความยาวของเหล็กเสริมที่มีอยู่

l_i คือ ความยาวของเหล็กเสริมแต่ละชิ้น, $i = 1, 2, \dots, m$

b_i คือ จำนวนเหล็กเสริมที่ต้องการของชิ้นที่ i , $i = 1, 2, \dots, m$

a_{ij} คือ จำนวนของเหล็กเสริม i ในรูปแบบนั้น

X_j คือ ความถี่ของรูปแบบ j ที่ใช้ในการตัด

ศึกษาหาตำแหน่งจุดต่อทาบภายในเสาและผนังรับแรงเฉือน ด้วยการกำหนดการเชิงเส้น โดยงานวิจัย [3] สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเสริมในงานก่อสร้างประเภทเสาได้ 52.2% และสามารถลดเศษเหล็กเสริมในงานก่อสร้างประเภทกำแพงรับแรงเฉือนได้ 55.8% เมื่อเทียบกับการต่อทาบแบบปกติตามแบบก่อสร้างโดย การหารูปแบบการตัดเหล็กเสริมด้วยสมการดังนี้

$$A_{i1} = \min\left(\frac{L}{l_1}, d_1\right) \quad (6)$$

$$A_{i2} = \min\left(\frac{L - A_{i1}l_1}{l_2}, d_2\right) \quad (7)$$

$$A_{iN} = \min\left(\frac{L - \sum_{j=1}^{N-1} A_{ij}l_j}{l_N}, d_N\right) \quad (8)$$

โดย L = ความยาวเหล็กมาตรฐาน

d_j = จำนวนเหล็กที่ต้องการ

l_j = ความยาวเหล็กที่ต้องการ

A_{ij} = จำนวนของความยาวเหล็ก l_j และรูปแบบที่ i

สำหรับแผนการตัดที่ j หากมีค่า k โดยให้ $K = j$ ที่มีค่ามากที่สุดโดย $1 \leq j \leq N$

$$A_{i1} = A_{(i-1)(1)}, \dots, A_{i(k-1)} = A_{(i-1)(k-1)} \quad (9)$$

$$A_{ik} = A_{(i-1)k} - 1 \quad (10)$$

สมการวัดอุปสงค์การตัดเหล็กให้เหลือเศษเหล็กที่น้อยที่สุด

$$\text{Minimize} \sum_{i \in P} (L_i X_i - (\sum_{j \in J} B_{ij} V_j)) \quad (11)$$

$$\text{สมการเงื่อนไข} \quad \sum_{i \in P} B_{ij} X_i = d_j, \forall j \in J \quad (12)$$

$$X_i \in Z^+, \forall i \in P \quad (13)$$

โดย i = ลำดับของรูปแบบการตัด

P = เซตของรูปแบบการตัดทั้งหมด

j = ลำดับของความยาวเหล็กที่ต้องการ

J = เซตของความยาวเหล็กทั้งหมด

L_i = ความยาวเหล็กมาตรฐานที่รูปแบบการตัดที่ i

V_j = ความยาวของเหล็กที่ต้องการ $j \in J$

B_{ij} = จำนวนทั้งหมดของความยาวเหล็ก j ที่ตัดมาจาก L_i

X_i = ตัวแปรตัดสินใจ

การศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณเศษเหล็กเสริมโดยการจัดกลุ่มของการตัดแบ่งเหล็กเสริม [2, 4-6] มีข้อจำกัดคือการบริหารจัดการเหล็กจากเหล็กความยาวมาตรฐานโดยไม่ได้นำแบบรายละเอียดของงานก่อสร้างมาพิจารณาเพื่อลดปริมาณเศษเหล็ก และการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณเศษเหล็กจากแบบรายละเอียดก่อสร้างและตำแหน่งจุดต่อทาบของเหล็กเสริม [3, 7] แต่มีข้อจำกัดคือการต่อทาบภายในเสาต้นเดียวไม่ได้ ประมวลผลทั้งโครงสร้างและมีข้อจำกัดในการคำนวณเนื่องจากต้องใช้การประมวลผลข้อมูลเป็นจำนวนมาก โดยงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาต่อยอดโดยการหาตำแหน่งการต่อทาบเหล็กเสริมภายในเสาเพื่อให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดด้วยกำหนดการเชิงเส้นโดยประมวลผลผ่าน Python

2.2 ตำแหน่งการต่อทาบเหล็กเสริมภายในเสา

มาตรฐานก่อสร้างของ มยผ. 1103-52 [8] มีการกำหนดระยะการต่อทาบของเหล็กเสริมโดย เหล็กเส้นกลมควรต่อทาบไม่น้อยกว่า 40 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นนั้นและให้ห่างปลาย 180 องศาด้วย ถ้าเหล็กเส้นกลมมีขนาดมากกว่า 15 ซม. จะสามารถอง 90 องศาได้ กรณีเหล็กข้ออ้อย SD30, SD40 และ SD50 ควรจะต่อทาบเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 30, 36, 45 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ตามลำดับ โดยไม่จำเป็นต้อง

ติดตั้งเหล็กเสริมนั้น และตำแหน่งของการต่อทาบตามมาตรฐานก่อสร้างของสถาบันคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ACI318-19) [9] สามารถทำการต่อทาบเหล็กเสริมภายในเสาในช่วง 1/4 ถึง 3/4 ของระยะหลังพื้นชั้นล่างถึงท้องพื้นชั้นบน

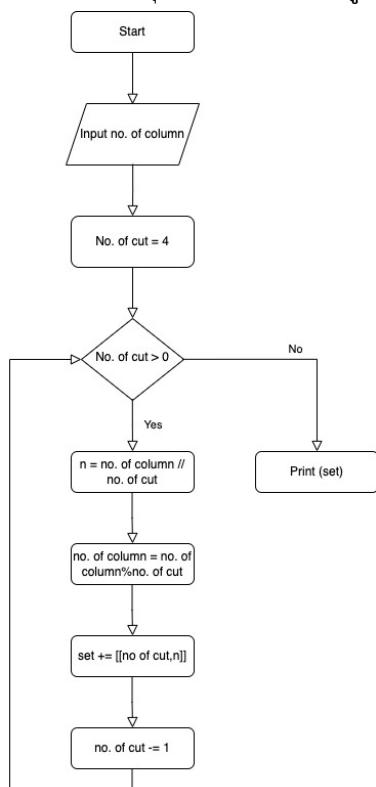
3. ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 กระบวนการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

สร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 มิติด้วยโปรแกรม Autodesk Revit จากนั้นทำการถอดปริมาณข้อมูลขนาดและปริมาณของเหล็กเสริม, ความสูงเสา เพื่อนำมาคำนวณหาการรูปแบบการต่อทาบเหล็กเสริมและการคำนวณหารูปแบบการตัดเหล็กเสริม

3.2 การจัดกลุ่มเสาที่มีประเภทเดียวกัน

เลือกเสาที่มีความสูงแต่ละชั้นที่เท่ากัน และมีปริมาณเหล็กเสริมที่เท่ากันมาทำการจัดกลุ่มในการแบ่งเหล็กเสริมจากความยาวเหล็กมาตรฐาน 1 เส้น โดยการนำเหล็กความยาวมาตรฐาน 1 เส้นมาแบ่งเป็นส่วนๆ ตามกลุ่มที่กำหนดไว้ ขั้นตอนการแบ่งกลุ่มสามารถดำเนินการดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการจัด/แบ่งกลุ่มเสา

รูปที่ 1 ขั้นตอนแรกจะทำการใส่จำนวนเสาที่เป็นประเภทเดียวกัน และทำการแบ่งเสาเป็นกลุ่มกลุ่มละ 4 ต้น เนื่องจาก 1 ชั้นของอาคาร โดยทั่วไปจะมีความสูงโดยประมาณที่ 3 เมตรและเหล็กมาตรฐานมีความยาวสูงสุดที่ 12 เมตรซึ่งเหล็ก 1 เส้นสามารถนำไปใช้กับเสา 4 ต้นโดยใช้ต้นละ 1 เส้น จึงแบ่งเป็นกลุ่มละ 4 ต้น เมื่อได้จำนวนกลุ่มที่พิเศษลงแล้ว นำเศษที่เหลือไปวนหาโดยการจัดกลุ่มเสาจะลดแบบ n-1 จนไม่เหลือจำนวนเสา เช่น มี

เสาที่มีความสูงแต่ละชั้นที่เท่ากัน และมีปริมาณเหล็กเสริมที่เท่ากัน 14 ต้น จะได้เซตออกมาดังนี้ [[4,3], [3,0], [2,1], [1,0]] จะทำการแบ่งกลุ่มเสาเป็นกลุ่มละ 4 ต้น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 2 ต้น 1 กลุ่ม เป็นต้น

3.3 การหาตำแหน่งจุดต่อทาบเหล็กเสริม

กำหนดสมการความยาวเหล็กเสริมแต่ละช่วงดังรูปที่ 3 โดยเสามีจำนวน n ชั้นแบ่งเป็น 3 ช่วงดังนี้

กำหนดความยาวชั้นที่ 1

$$L = l_p + \frac{h_1}{2} + h_0 - covering + hook + x_1 \quad (14)$$

กำหนดความยาวชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ n-1

$$L = l_p + \frac{h_1}{2} + h_0 / 2 + x_1 - x_0 \quad (15)$$

และกำหนดความยาวชั้นที่ n

$$L_{i+1} = \frac{h_1}{2} + h_2 - covering + hook - x_1 \quad (16)$$

โดย l_p คือระยะการต่อทาบของเหล็กเสริม

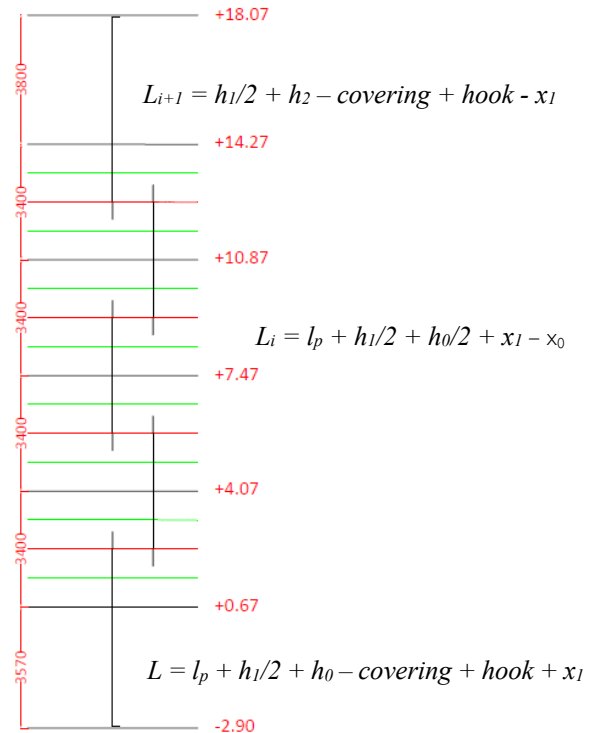
h_0 คือความสูงชั้นก่อนหน้า

h_1 คือความสูงระหว่างชั้นที่พิจารณา

h_2 คือความสูงชั้นถัดไปที่พิจารณา

x_0 คือตำแหน่งการต่อทาบจากกึ่งกลางเสาของชั้นก่อนหน้า

x_1 คือตำแหน่งการต่อทาบจากกึ่งกลางเสาในชั้นที่พิจารณา



รูปที่ 2 ตัวอย่างการกำหนดสมการความยาวเหล็กเสริม

โดยกำหนดสมการวัตถุประสงค์ คือ

$$Minimize(R) = L_s - L_a - L_b - L_c - L_d \quad (17)$$

โดย R คือเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดเหล็กเสริม

L_s คือ ตัวแปรตัดสินใจเลือกจากเซตของความยาวเหล็กมาตรฐาน

{8 ม., 10 ม., 12 ม.}

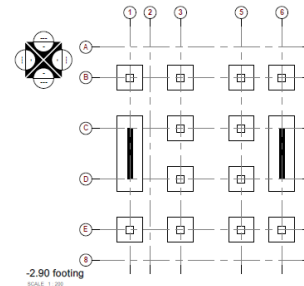
L_a, L_b, L_c, L_d คือ ความยาวเหล็กใช้ในเสาต้น a, b, c, d ตามลำดับ

กำหนดสมการเงื่อนไขคือ

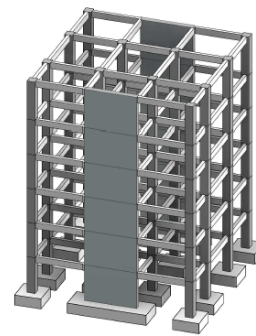
$$R \geq 0 \tag{18}$$

$$L_a, L_b, L_c, L_d \geq 0 \tag{19}$$

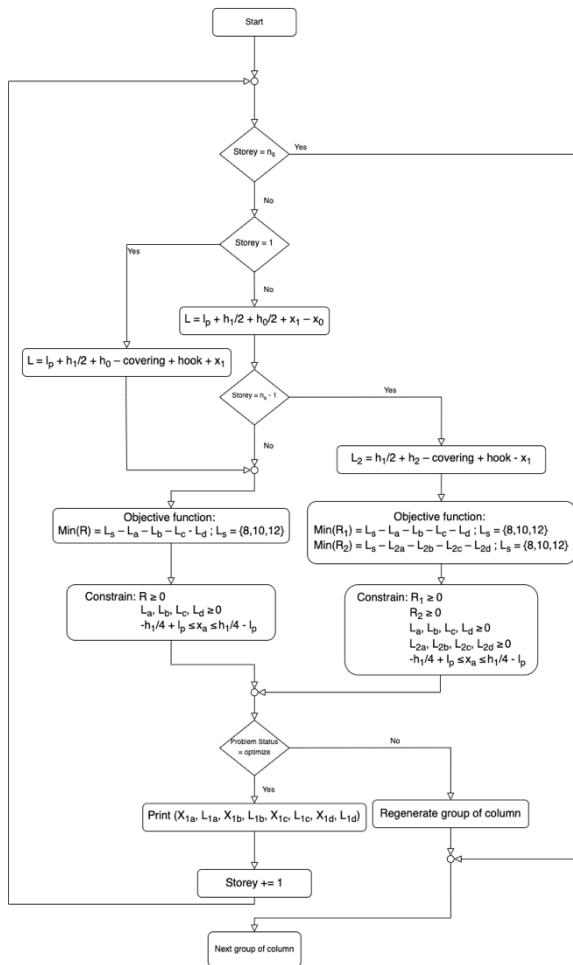
$$\frac{-h_1}{4} + l_p \geq X_1 \geq \frac{h_1}{4} - l_p \tag{20}$$



รูปที่ 4 แบบแปลนฐานราก



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างสามมิติ



รูปที่ 3 แผนภาพการคำนวณหาจุดต่อทาบของเสาแต่ละชั้น

นำข้อมูลไปประมวลผลด้วย Python หาตำแหน่งของการต่อทาบภายในเสาแต่ละชั้นจากนั้นนำไปสร้างเป็นแบบรายละเอียดก่อสร้างและรายการตัดเหล็กเสริมสำหรับใช้ในงานก่อสร้างจริง ถ้าในกรณีที่ไม่สามารถหาการตัดที่เป็นไปได้จะทำการจัดกลุ่มเสาใหม่โดยลดจำนวนการตัดแบ่งลง 1 ครั้งและนำไปประมวลผลใหม่อีกครั้ง

4. ผลการวิจัย

4.1 ข้อมูลพื้นฐานโครงสร้างอาคาร

จากการสร้างโมเดลโครงสร้างอาคาร 6 ชั้นสามารถแสดงผลได้ดัง

รูปที่ 4-5

<Structural Column Schedule>						
	A	B	C	D	E	F
Type	Base Level	Top Level	Length	Comments	Count	
C1	-2.90 footing	+0.67 Ground	3.57	24-DB16	12	
C1	+0.67 Ground	+4.07 LV 1	3.40	20-DB16	12	
C1	+4.07 LV 1	+7.47 LV 2	3.40	20-DB16	12	
C1	+7.47 LV 2	+10.87 LV 3	3.40	16-DB16	12	
C1	+10.87 LV 3	+14.27 LV 4	3.40	12-DB16	12	
C1	+14.27 LV 4	+18.07 LV 5	3.80	12-DB16	12	

รูปที่ 6 การนำข้อมูลออกจากแบบจำลอง

จากการถอดปริมาณงานโครงสร้างอาคารจากแบบจำลองโมเดลด้วยโปรแกรม Autodesk Revit มีจำนวนเสาทั้งหมด 12 ต้น, ความสูงแต่ละชั้นจากรานรากถึงพื้นชั้น 1 ความสูง 3.57 เมตร ใช้เหล็กเสริม 24-DB16 จากพื้นชั้น 1 ถึงพื้นชั้น 2 ความสูง 3.40 เมตร ใช้เหล็กเสริม 20-DB16 จากพื้นชั้น 2 ถึงพื้นชั้น 3 ความสูง 3.40 เมตร ใช้เหล็กเสริม 20-DB16 จากพื้นชั้น 3 ถึงพื้นชั้น 4 ความสูง 3.40 เมตร ใช้เหล็กเสริม 16-DB16 จากพื้นชั้น 4 ถึงพื้นชั้น 5 ความสูง 3.40 เมตร ใช้เหล็กเสริม 12-DB16 จากพื้นชั้น 5 ถึงพื้นชั้น 6 ความสูง 3.80 เมตร ใช้เหล็กเสริม 12-DB16

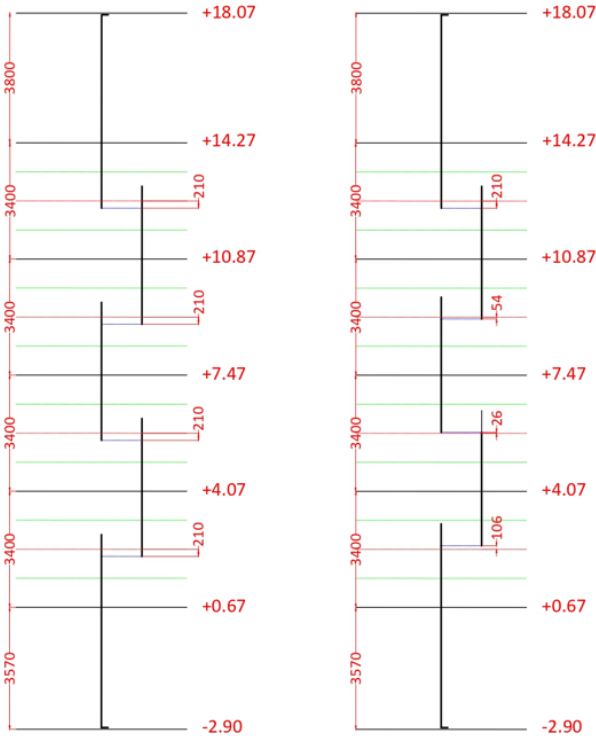
4.2 ผลการคำนวณหาตำแหน่งจุดต่อทาบและการตัดเหล็กเสริม

ข้อมูลไปประมวลผลตามขั้นตอนการปฏิบัติงาน ได้ผลลัพธ์เป็นตำแหน่งของการต่อทาบเหล็กเสริมโดยการจัดกลุ่มเสา โดยเริ่มด้วยการแบ่งกลุ่มละ 4 ต้น 3 กลุ่ม แล้วนำมาประมวลผลซึ่งเกิดกรณีที่ตัดเหล็กไม่เพียงพอจึงแบ่งกลุ่มใหม่กลุ่มละ 3 ต้น 4 กลุ่มแล้วนำมาประมวลผลซึ่งเกิดกรณีที่ตัดเหล็กไม่เพียงพอจึงแบ่งกลุ่มใหม่กลุ่มละ 2 ต้น 6 กลุ่มจากนั้นนำมาประมวลผลซึ่งสามารถหากรณีที่เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดได้ จึงนำ

จำนวนเสาทั้งหมดมากำหนดแบ่งเป็นเสาประเภท a และ b แต่ละกลุ่มจะนำเหล็กเสริมความยาวมาตรฐาน 1 เส้นมาแบ่งเป็น 2 ท่อนสำหรับเสา 2 ต้น ได้ตำแหน่งตอทาบดังตารางที่ 1 และรูปที่ 7 ทำการตัดเหล็กและตอทาบในตำแหน่งดังกล่าวทั้งหมด 6 ชุด

ตารางที่ 1 ตำแหน่งของการตอทาบและความยาวเหล็กเสริมเสา a และ b

ชั้นที่	จำนวนที่ตอกเสา 1 ต้น	ตัดจากเหล็กมาตรฐาน (ม.)	เศษเหลือจากการตัด (มม.)	ตำแหน่งจุดตอทาบเสาต้น a (มม.)	ความยาวเหล็กเสริมเสาต้น a (มม.)	ตำแหน่งจุดตอทาบเสาต้น b (มม.)	ความยาวเหล็กเสริมเสาต้น b (มม.)
1-2	24	12	0.00	-210	5,842	+106	6,158
2-3	20	8	0.00	-210	4,040	+26	3,960
3-4	20	8	0.00	-210	4,040	-54	3,960
4-5	16	8	76.00	-210	4,040	-210	3,884
5-6	12	12	296.00	-210	5,852	-210	5,852



รูปที่ 7 ตำแหน่งของการตอทาบของเสาต้น a และ เสาต้น b

ตารางที่ 2 ความยาวเหล็กมาตรฐานที่ใช้จากการปรับจุดตอทาบ

ความยาวเหล็กมาตรฐาน (ม.)	จำนวนเหล็กที่ใช้ (เส้น)
8	336
10	0
12	216

ตารางที่ 3 ปริมาณเศษเหล็กเสริมจากการปรับจุดตอทาบ

ความยาวเหล็กทั้งหมด (ม.)	5,280.000
--------------------------	-----------

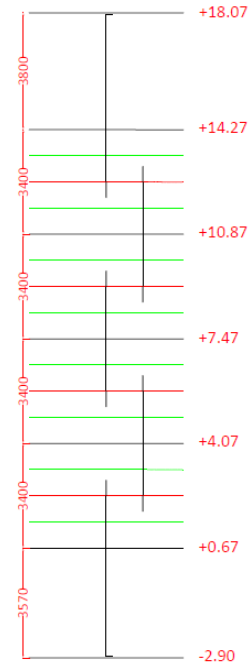
เศษเหล็กที่เหลือจากการตัดทั้งหมด (ม.)	28.608
เศษเหลือจากการตัด (%)	0.54

จากการทดสอบการปรับตำแหน่งการตอทาบภายในเสาเหลือเศษเหล็กจากการตัดเหล็กเสริมอยู่ที่ 28.608 เมตรจากความยาวเหล็กที่ใช้ทั้งหมด 5,280.000 เมตรคิดเป็น 0.54% ของปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ทั้งหมด

นำมาเปรียบเทียบกับเสาที่ทำการตอทาบที่จุดกึ่งกลางเสาทุกต้น โดยทำการตัดจากความยาวเหล็กมาตรฐานที่ 12 เมตร ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 8 โดยนำเหล็กเสริมทั้งหมดจากเสา 12 ต้นมาหากรณีที่เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดด้วย Simplex LP โดยประมวลผลด้วย Microsoft Excel

ตารางที่ 4 ความยาวเหล็กเสริมในการตอทาบที่กึ่งกลางเสา

ชั้นที่	จำนวนที่ต้องการตอกเสา 1 ต้น (เส้น)	จำนวนเสาทั้งหมด (ต้น)	ตำแหน่งจุดตอทาบที่กึ่งกลางเสา (มม.)	ความยาวเหล็กเสริมตอทาบที่กึ่งกลางเสา (มม.)	จำนวนเหล็กที่ต้องการ (เส้น)
1-2	24	12	0	5912	288
2-3	20	12	0	4400	240
3-4	20	12	0	4400	240
4-5	16	12	0	4400	192
5-6	12	12	0	6142	144



รูปที่ 8 ตำแหน่งของการตอทาบของเสาที่กึ่งกลางต้น

ตารางที่ 5 รูปแบบการตัดเหล็กเสริมที่เหลือเศษน้อยที่สุดจากการตอทาบที่กึ่งกลางเสา

ความยาวเหล็กที่ต้องการ (มม.)	5,912	4,400	4,400	4,400	6,142	จำนวนชุดทั้งหมด
จำนวนในการตัดแบ่งจากเหล็กความ	0	0	1	1	0	24
	0	1	0	0	1	144
	0	1	1	0	0	96

ยาวมาตรฐาน ที่ 12 เมตร	1	0	0	1	0	168
	1	0	1	0	0	120

ตารางที่ 6 ความยาวเหล็กมาตรฐานที่ใช้จากการต่อทาบที่กึ่งกลางเสา

ความยาวเหล็กมาตรฐาน (ม.)	จำนวนเหล็กที่ใช้ (เส้น)
12	552

ตารางที่ 7 ปริมาณเศษเหล็กเสริมจากการต่อทาบที่กึ่งกลางเสา

ความยาวเหล็กทั้งหมด (ม.)	6,624.000
เศษเหล็กที่เหลือจากการตัดทั้งหมด (ม.)	1,080.096
เศษเหลือจากการตัด (%)	16.31

จากการทดสอบการต่อทาบที่จุดกึ่งกลางเสาเหลือเศษเหล็กจากการตัดเหล็กเสริมอยู่ที่ 1,080.096 เมตรจากความยาวเหล็กที่ใช้ทั้งหมด 6,624.00 เมตรคิดเป็น 16.31% ของปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ทั้งหมด

4.3 สรุปผลปริมาณเศษเหล็กเสริม

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบเศษเหล็กเสริมจากการปรับและไม่ปรับตำแหน่งต่อทาบ

	ปรับตำแหน่งต่อทาบ	ต่อทาบที่กึ่งกลาง เสา	ผลต่าง
ความยาวเหล็ก ทั้งหมด (ม.)	5,280.000	6,624.000	1,344.000
น้ำหนักเหล็ก ทั้งหมด(กก.)	8,342.400	10,465.920	2,123.520

จากการทดสอบงานวิจัยดังกล่าว สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเสริมจากการปรับตำแหน่งของการต่อทาบภายในเสา 2,123.520 กิโลกรัมจาก 10,465.920 คิดเป็น 20.29% จากเหล็กเสริมที่ใช้ในเสาทั้งหมด

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลงานวิจัยพบว่า เราสามารถลดปริมาณเศษเหล็กเสริมสำหรับโครงสร้างเสาให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยใช้แบบจำลองสารสนเทศ (BIM) มาคำนวณหาความสูงแต่ละชั้น จากนั้น นำอาศัยหลักการ Optimization โดยใช้กำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งประมวลผลด้วย Python เพื่อแก้สมการดังกล่าว เพื่อหาตำแหน่งในการต่อทาบภายในเสาแต่ละชั้น ที่ทำให้ได้ความยาวของเหล็กเสริมที่ต้องการ และรูปแบบการตัดเหล็กเสริมที่มีประสิทธิภาพที่สุด

งานวิจัยดังกล่าวมีข้อจำกัดคือสามารถใช้งานได้ดีในอาคารที่มีความสูงระหว่างชั้นที่สูงกว่า 3 เมตรและเหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 20 มิลลิเมตร

ทั้งนี้ผู้วิจัยแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการลดปริมาณเศษเหล็กเสริมจากการหาตำแหน่งต่อทาบภายในเสาไปพัฒนาต่อสำหรับการตัดเหล็กในรูปแบบโครงสร้างอื่นๆ เช่น คาน หรือ พื้น นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาให้ออกมาในโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้งานได้สะดวกมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนที่ได้รับจัดสรรเพื่อการวิจัยพื้นฐานจากหน่วยงานภาครัฐ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 งานพื้นฐาน

(Fundamental Fund) ภายใต้แผนปฏิบัติการและแผนงาน ด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขที่ IND66210025

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งจ้อรัมย์วงศ์ ที่ให้แรงบันดาลใจ ก่อให้เกิดหัวข้องานวิจัยชิ้นนี้ ทั้งยังให้คำแนะนำ ความรู้ และกำลังใจอันสำคัญกับผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาและขอขอบพระคุณ นายอานัติ สุธา และนางสาววรัญญา เจริญยิ่ง ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาการใช้งานโปรแกรมต่างๆ และให้คำแนะนำในการปรับแก้ งานวิจัย ทั้งในและนอกเวลาวิชาการตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ali, H., Navdeep B. and Ahana, G., Air Pollution from Global Steel Industry, An International Benchmarking of Criteria Air Pollutants Intensities, pp. 12-18
- [2] Gbemileke, A., Ogunranti, A. and Ouleye (2016), Minimizing Waste (Off-cuts) Using Cutting Stock Model: The Case of One Dimensional Cutting Stock Problem in Wood Working Industry, Industrial Engineering and Management, pp.834-859.
- [3] Zahara, S., Moussavi, N., Ahmed, W.A., Hammad, Jianzhuang, X. and Ali A. (2018), Minimizing cutting wastes of reinforcing steel bars through optimizing lap splicing within reinforced concrete elements, Construction and Building Materials, 185, pp. 600-608.
- [4] Khalifa, Y., Salem, O. and Shahin, A. (2006), Cutting Stock Waste Reduction Using Genetic Algorithms, pp.1675-1680.
- [5] Dongho, L., Seunghyun, S., Doyeong K., and Sunkuk, K. (2020), Special-Length-Priority Algorithm to Minimize Reinforcing Bar-Cutting Waste for Sustainable Construction, Sustainability, 12, 5950, pp.1-15.
- [6] Melhem, N., N., Maher, R., A. and Sundermeier, M. (2021), Waste-Based Management of Steel Reinforcement Cutting in Construction Projects, Construction of Engineering and management, 174, 04021056, pp. 1-41.
- [7] Chaoyu, Z. and Ming, L. (2016), Optimized Reinforcement Detailing Design for Sustainable Construction: Slab Case Study, Procedia Engineering, 145, pp.1478-1485.
- [8] มยพ. 1103-52, มาตรฐานงานเหล็กเสริมคอนกรีตม (2564), กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย.
- [9] ACI, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (2008), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.