การลดจำนวนให้น้อยที่สุดของเศษที่เหลือจากการตัดเหล็กเสริมในการก่อสร้างอาคาร

Cutting waste minimization of reinforced bars in building construction

เจตณัฐ ประภพรัตนกุล[1],

เสื่อมสภาพลงแล้วจะส่งผลให้เป็นเศษเหล็กเหลือใช้ที่รอการทิ้งเป็นจำนวนมาก เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ และก่อให้เกิดของเสียอันตราย [1]

ดังนั้นบทความนี้ได้มีการนำเสนอวิธีการดำเนินการเพื่อหาตำแหน่งจุดต่อทาบที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเสริมในงานก่อสร้างให้เหลือน้อยที่สุด โดยพิจารณาการลดปริมาณเศษเหล็กเสริมภายในเสาในงานโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทหล่อในที่ ซึ่งเป็นงานโครงสร้างที่มีเศษเหล็กมากกว่างานโครงสร้างประเภทอื่น โดยกลุ่มตัวอย่างคืองานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 6 ชั้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาการแก้ไขปัญหาการตัดแบ่งพัสดุแบบหนึ่งมิติด้วยกำหนดการเชิงเส้น [2] ในอุตสาหกรรมไม้เพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างจริงซึ่งสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้ 30.7% เมื่อเทียบกับการตัดตามแบบปกติ โดยการศึกษานี้ใช้แนวทางเชิงรูปแบบ (pattern oriented formulation) ในการกำหนดแบบจำลองการตัดแบ่ง (cutting stock model) โดยแบบจำลองที่ได้นั้นเป็นโปรแกรมเชิงเส้นที่จำกัดด้วยรูปแบบการตัดแบ่งจำนวนมาก และรูปแบบการตัดแบ่งนั้นหาโดยการใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นโดยเขียนด้วยภาษา Visual basic ปัญหาการตัดแบ่งพัสดุมีแบบจำลองในรูปสมการวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Minimize \quad \sum_{j=1}^{n} X_j \tag{1}$$

สมการเงื่อนไข $$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} X_j \geq b_i, i = 1,2,3,...,m \tag{2}$$

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

$$a_{ij} \geq 0, a \text{ integer} \tag{4}$$

$$X_j \geq 0, X_j \text{ integer}, j = 1,2,3,...n \tag{5}$$

โดย L คือ ความยาวของเหล็กเสริมที่มีอยู่

l_i คือ ความยาวของเหล็กเสริมแต่ละชิ้น, $i = 1,2,$ -!

b_i คือ จำนวนเหล็กเสริมที่ต้องการของชิ้นที่ i, $i = 1,2,$ -

a_{ij} คือ จำนวนของเหล็กเสริม i ในรูปแบบนั้น

X_j คือ ความถี่ของรูปแบบ j ที่ใช้ในการตัด

ศึกษาหาตำแหน่งจุดต่อทาบภายในเสาและผนังรับแรงเฉือน ด้วยการใช้กำหนดการเชิงเส้น โดยงานวิจัย [3] สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเสริมในงานก่อสร้างประเภทเสาได้ 52.2% และสามารถลดเศษเหล็กเสริมในก่อสร้างประเภทกำแพงรับแรงเฉือนได้ 55.8% เมื่อเทียบกับการต่อทาบแบบปกติตามแบบก่อสร้างโดย การหารูปแบบการตัดเหล็กเสริมด้วยสมการดังนี้

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

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

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

โดย L = ความยาวเหล็กมาตรฐาน

d_j = จำนวนเหล็กที่ต้องการ

l_j = ความยาวเหล็กที่ต้องการ

A_{ij} = จำนวนของความยาวเหล็ก l_j และรูปแบบที่ i

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

$$A_{i1} \quad A_{(i-1)(1)}, ..., A_{i(k-1)} \quad A_{(i-1)(k-1)} \tag{9}$$

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

สมการวัตถุประสงค์การตัดเหล็กให้เหลือเศษเหล็กที่น้อยที่สุด

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

สมการเงื่อนไข $$\sum_{i \in P} B_{ij} X_i \geq d_j, \quad j \in J \tag{12}$$

$$X_i \geq Z, \quad i \in P \tag{13}$$

โดย i = ลำดับของรูปแบบการตัด

P= เซตของรูปแบบการตัดทั้งหมด

j = ลำดับของความยาวเหล็กที่ต้องการ

J = เซตของความยาวเหล็กทั้งหมด

L_i = ความยาวเหล็กมาตรฐานที่รูปแบบการตัดที่ i

V_j = ความยาวของเหล็กที่ต้องการ $j \quad J$

B_{ij} = จำนวนทั้งหมดของความยาวเหล็ก j ที่ตัดมาจาก L_i

X_i = ตัวแปรตัดสินใจ

การศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณเศษเหล็กเสริมโดยการจัดกลุ่มของการตัดแบ่งเหล็กเสริม [2, 4-6] มีข้อจำกัดคือการบริหารการจัดการเหล็กจากเหล็กความยาวมาตรฐานโดยไม่ได้นำแบบรายละเอียดของงานก่อสร้างมาพิจารณาเพื่อลดปริมาณเศษเหล็ก และการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณเศษเหล็กจากแบบรายละเอียดก่อสร้างและตำแหน่งจุดต่อทาบของเหล็กเสริม [3, 7] แต่มีข้อจำกัดคือการต่อทาบภายในเสาต้นเดียวไม่ได้ประมวลผลทั้งโครงอาคารและมีข้อจำกัดในการคำนวณเนื่องจากต้องใช้การประมวลผลข้อมูลเป็นจำนวนมาก โดยงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาต่อยอดโดยการหาตำแหน่งการต่อทาบเหล็กเสริมภายในเสาเพื่อให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดด้วยกำหนดการเชิงเส้นโดยประมวลผลผ่าน Python

2.2 ตำแหน่งการต่อทาบเหล็กเสริมภายในเสา

มาตรฐานก่อสร้างของ มยผ. 1103-52 [8] มีการกำหนดระยะการต่อทาบของเหล็กเสริมโดย เหล็กเส้นกลมควรต่อทาบไม่น้อยกว่า 40 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นนั้นและให้งอปลาย 180 องศาด้วย ถ้าเหล็กเส้นกลมมีขนาดมากกว่า15ซม. จะสามารถงอ 90 องศาได้ กรณีเหล็กข้ออ้อย SD30, SD40 และ SD50 ควรจะต่อทาบเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 30, 36, 45 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ตามลำดับ โดยไม่จำเป็นต้องดัดงอเหล็กเสริมนั้น และตำแหน่งของการต่อทาบตามมาตรฐานก่อสร้าง

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

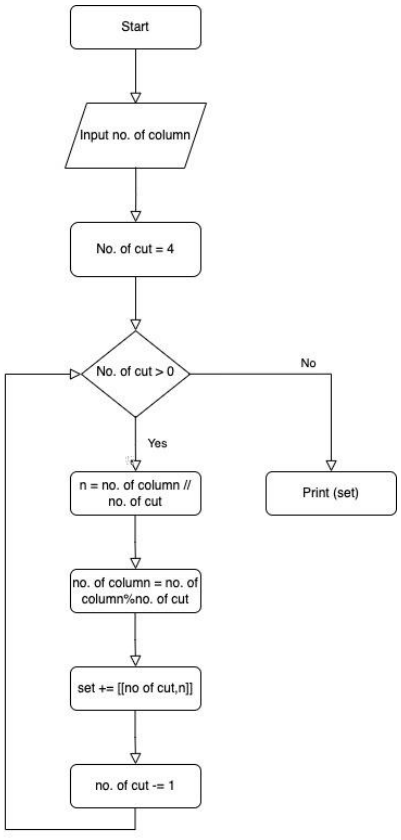
3. ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 กระบวนการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

สร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 มิติด้วยโปรแกรม Autodesk Revit จากนั้นทำการถอดปริมาณข้อมูลขนาดและปริมาณของเหล็กเสริม, ความสูงเสา เพื่อนำมาคำนวณหาการรูปแบบการต่อทาบเหล็กเสริมและการคำนวณหารูปแบบการตัดเหล็กเสริม

3.2 การจัดกลุ่มเสาที่มีประเภทเดียวกัน

เลือกเสาที่มีความสูงแต่ละชั้นที่เท่ากัน และมีปริมาณเหล็กเสริมที่เท่ากันมาทำการจัดกลุ่มในการแบ่งเหล็กเสริมจากความยาวเหล็กมาตรฐาน 1 เส้น โดยการนำเหล็กความยาวมาตรฐาน 1 เส้นมาแบ่งเป็นส่วนๆ ตามกลุ่มที่กำหนดไว้ ขั้นตอนการแบ่งกลุ่มสามารถดำเนินการดัง**รูปที่ 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 เมื่อได้จำนวนกลุ่มที่ปัดเศษลงแล้ว นำเศษที่เหลือไปวนหาโดยการจัดกลุ่มเสาจะลดแบบ n-1 จนไม่เหลือจำนวนเสา เช่น มีเสาที่มีความสูงแต่ละชั้นที่เท่ากัน 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

กำหนดสมการความยาวเหล็กเสริมแต่ละช่วงดัง**รูปที่ 3** โดยเสามีจำนวน n ชั้นแบ่งเป็น 3 ช่วงดังนี้

กำหนดความยาวชั้นที่ 1

$$L \quad l_p \quad \frac{h_1}{2} \quad h_0 - covering \quad hook \quad x_1 \tag{14}$$

กำหนดความยาวชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ n-1

$$L \quad l_p \quad \frac{h_1}{2} \quad h_0 / 2 \quad x_1 - x_0 \tag{15}$$

และกำหนดความยาวชั้นที่ n

$$L_{i\ 1} \quad \frac{h_1}{2} \quad h_2 - covering \quad hook \ - x_1 \tag{16}$$

โดย l_p คือระยะการต่อทาบของเหล็กเสริม

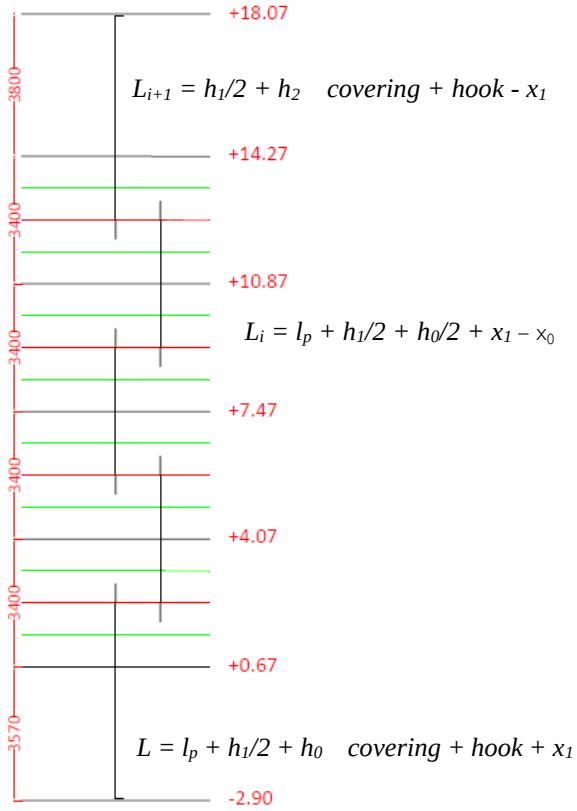
h คือความสูงชั้นก่อนหน้า

h_1 คือความสูงระหว่างชั้นที่พิจารณา

h_2 คือความสูงชั้นถัดไปที่พิจารณา

x_0 คือตำแหน่งการต่อทาบจากกึ่งกลางเสาของชั้นก่อนหน้า

x_1 คือตำแหน่งการต่อทาบจากกึ่งกลางเสาในชั้นที่พิจารณา



รูปที่ 2 ตัวอย่างการกำหนดสมการความยาวเหล็กเสริม

โดยกำหนดสมการวัตถุประสงค์ คือ

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

โดย R คือเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดเหล็กเสริม

L_s คือ ตัวแปรตัดสินใจเลือกจากเซตของความยาวเหล็กมาตรฐาน {8 ม., 10 ม.,12 ม.}

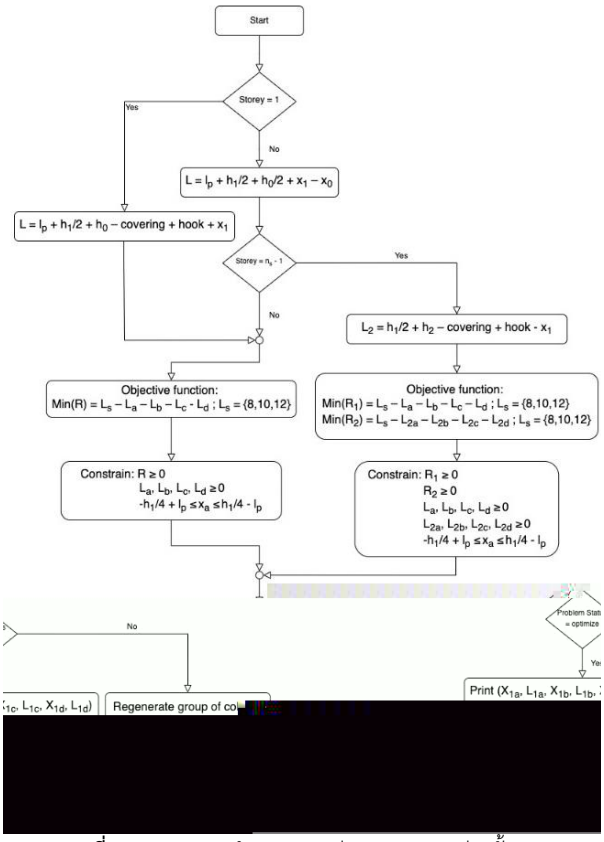
L_a, L_b, L_c, L_d คือ ความยาวเหล็กใช้ในเสาต้น a, b, c, d ตามลำดับ

กำหนดสมการเงื่อนไขคือ

$$R \quad 0 \qquad (18)$$

$$L_a, L_b, L_c, L_d \quad 0 \qquad (19)$$

$$\frac{h_1}{4} \quad l_p \quad X_1 \quad \frac{h_1}{4} \quad l_p \qquad (20)$$



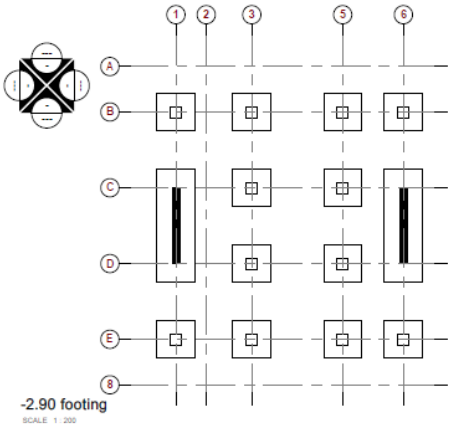
รูปที่ 3 แผนภาพการคำนวณหาจุดต่อทาบของเสาแต่ละชั้น

นำข้อมูลไปประมวลผลด้วย Python หาตำแหน่งของการต่อทาบภายในเสาแต่ละชั้นจากนั้นนำไปสร้างเป็นแบบรายละเอียดก่อสร้างและรายการตัดเหล็กเสริมสำหรับใช้ในงานก่อสร้างจริง ถ้าในกรณีที่ไม่สามารถหาการตัดที่เป็นไปได้จะทำการจัดกลุ่มเสาใหม่โดยลดจำนวนการตัดแบ่งลง 1 ครั้งและนำไปประมวลผลใหม่อีกครั้ง

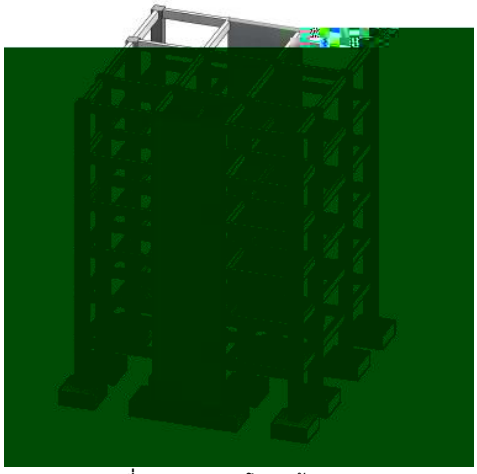
4. ผลการวิจัย

4.1 ข้อมูลพื้นฐานโครงสร้างอาคาร

จากการสร้างโมเดลโครงสร้างอาคาร 6 ชั้นสามารถแสดงผลได้ดัง **รูปที่ 4-5**



รูปที่ 4 แบบแปลนฐานราก



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างสามมิติ

<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

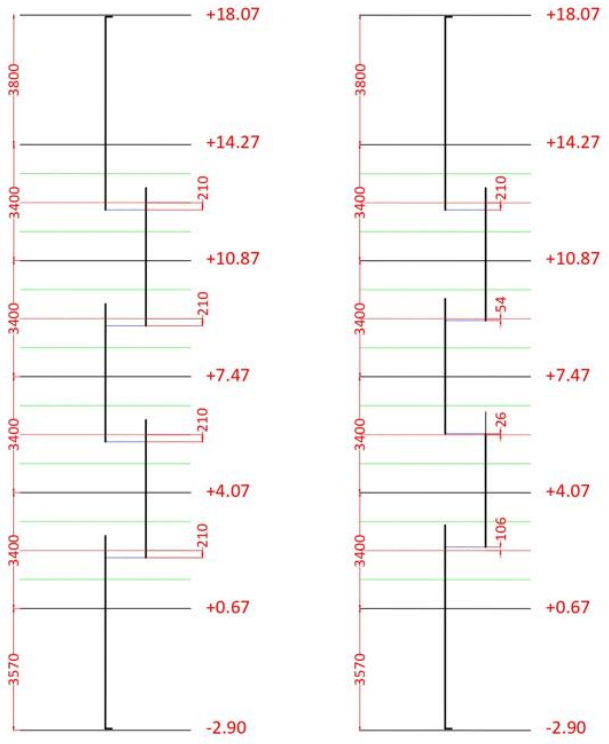
จากการถอดปริมาณงานโครงสร้างอาคารจากแบบจำลองโมเดลด้วยโปรแกรม Autodesk Revit มีจำนวนเสาทั้งหมด 12 ต้น, ความสูงแต่ละชั้นจากฐานรากถึงพื้นชั้น 1 ความสูง 3.57 เมตร ใช้เหล็กเสริม 24-DB16 จากพื้นชั้น 1 ถึงพื้นชั้น 2 ความสูง 3.40 เมตร ใช้เหล็กเสริม 20-DB16 จากพื้นชั้น 2 ถึงพื้นชั้น 3 ความสูง 3.40 เมตร ใช้เหล็กเสริม 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 จึงนำจำนวนเสาทั้งหมดมากำหนดแบ่งเป็นเสาประเภท a และ b แต่ละกลุ่มจะนำเหล็กเสริมความยาวมาตรฐาน 1 เส้นมาแบ่งเป็น 2 ท่อนสำหรับเสา 2 ต้น ได้ตำแหน่งต่อทาบดัง**ตารางที่ 1** และ**รูปที่ 7** ทำการตัดเหล็กและต่อทาบในตำแหน่งดังกล่าวทั้งหมด 6 ชุด

ตารางที่ 1 ตำแหน่งของการต่อทาบและความยาวเหล็กเสริมเสา a และ b

ชั้นที่	จำนวนที่ต้องการต่อเสา 1ต้น	ตัดจากความยาวเหล็กมาตรฐาน (ม.)	เศษเหลือจากการตัด (มม.)	ตำแหน่งจุดต่อทาบเสาต้น a (มม.)	ความยาวเหล็กเสริมเสาต้น a (มม.)	ตำแหน่งจุดต่อทาบเสาต้น 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	2,96.00	-210	5,852	-210	5,852



รูปที่ 7 ตำแหน่งของการต่อทาบของเสาต้น a และ เสาต้น b

ตารางที่ 2 ความยาวเหล็กมาตรฐานที่ใช้จากการปรับจุดต่อทาบ

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

ตารางที่ 3 ปริมาณเศษเหล็กเสริมจากการปรับจุดต่อทาบ

ความยาวเหล็กทั้งหมด (ม.)	5,280.000
เศษเหล็กที่เหลือจากการตัดทั้งหมด (ม.)	2.232
เศษเหลือจากการตัด (%)	0.04

จากการทดสอบการปรับตำแหน่งการต่อทาบภายในเสาเหลือเศษเหล็กจากการตัดเหล็กเสริมอยู่ที่ 2.232 เมตรจากความยาวเหล็กที่ใช้ทั้งหมด 5,280.000 เมตรคิดเป็น 0.04% ของปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ทั้งหมด

นำมาเปรียบเทียบกับเสาที่ทำการต่อทาบที่จุดกึ่งกลางเสาทุกต้น โดยทำการตัดจากความยาวเหล็กมาตรฐานที่ 12 เมตร ดัง**ตารางที่ 4** และ**รูปที่ 8** โดยนำเหล็กเสริมทั้งหมดจากเสา 12 ต้นมาหากรณีที่เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุดด้วย Simplex LP โดยประมวลผลด้วย Microsoft Excel

ตารางที่ 4 ความยาวเหล็กเสริมในการต่อทาบที่กึ่งกลางเสา

ชั้นที่	จำนวนที่ต้องการต่อเสา 1 ต้น(เส้น)	จำนวนเสาทั้งหมด (ต้น)	ตำแหน่งจุดต่อทาบที่กลางเสา (มม.)	ความยาวเหล็กเสริมต่อทาบที่กลางเสา (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 ตำแหน่งของการต่อทาบของเสาที่กึ่งกลางต้น

ตารางที่ 5 รูปแบบการตัดเหล็กเสริมที่เหลือเศษน้อยที่สุดจากการต่อทาบที่กึ่งกลางเสา

ความยาวเหล็กที่ต้องการ (มม.)	5,912	4,400	4,400	4,400	6,142	จำนวนชุดทั้งหมด
จำนวนในการตัดแบ่งจากเหล็กความยาวมาตรฐานที่ 12 เมตร	0	0	1	1	0	24
	0	1	0	0	1	144
	0	1	1	0	0	96
	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	ต่อทาบที่กึ่งกลางเสา	ผลต่าง
ความยาวเหล็กทั้งหมด (ม.)	5,280.000	6,624.000	1,344.000
น้ำหนักเหล็กทั้งหมด(กก.)	8,342.400	10,465.920	2123.520

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

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลงานวิจัยพบว่า เราสามารถลดปริมาณเศษเหล็กเสริมสำหรับโครงสร้างเสาให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยใช้แบบจำลองสารสนเทศ (BIM) มาคำนวณหาความสูงแต่ละชั้น จากนั้นอาศัยหลักการ 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 ตั้งอร่ามวงศ์ ที่ให้แรงบันดาลใจ ก่อให้เกิดหัวข้องานวิจัยชิ้นนี้ ทั้งยังให้คำแนะนำ ความรู้ และกำลังใจอันสำคัญกับผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาและขอขอบพระคุณ นายอาณัติ สุธา และนางสาววรัญญา เจริญยิ่ง ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาการใช้งานโปรแกรมต่างๆ และให้คำแนะนำในการปรับแก้งานวิจัย ทั้งในและนอกเวลาราชการตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

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, Sustainibility, 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] มยผ. 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.