

การประยุกต์ใช้กระบวนการแบบจำลองข้อมูลอาคารจัดทำรายการบัญชีการตัดเหล็ก

APPLICATION OF BUILDING INFORMATION MODELING PROCESS TO DEVELOP REBAR CUTTING LIST

ไพจิตร ผาวัน¹, ปณิตาสิต สัญญาโณ^{2*}

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพมหานคร

²นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author address: pajit.pa@spu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการแบบจำลองข้อมูลอาคารจัดทำรายการบัญชีการตัดเหล็ก โดยอาศัยทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้นช่วยในการวิเคราะห์หาปริมาณเศษเหล็กของเสาโครงกรงอาคารเรียน 4 ชั้น 324ล-55 ตันแผ่นดินไหว การศึกษาเริ่มจากกำหนดรูปแบบการต่อทาบเหล็กขึ้นที่เป็นไปได้ตามมาตรฐานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้านแผ่นดินไหว มยพ. 1301/1302-61 ทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 (C1-1) ต่อทาบเหล็กขึ้นกึ่งกลางชั้น 2 รูปแบบที่ 2 (C1-2) ต่อทาบเหล็กขึ้นกึ่งกลางชั้น 3 และรูปแบบที่ 3 (C1-3) ต่อทาบเหล็กขึ้นกึ่งกลางทุกชั้น ด้วยซอฟต์แวร์ BIM “ออโต้เดสก์ เรวิท” ประมวลผลออกมาเป็นตารางรายการบัญชีการตัดเหล็ก จากนั้นนำรูปการตัดเหล็ก (Rebar Number) ในตารางรายการบัญชีการตัดเหล็กมากำหนดตัวแปรการตัดเหล็กเพื่อหาค่าความเหมาะสมการตัดเหล็ก โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มความยาวเหล็กเส้นเป็น 3 กลุ่ม ความยาวเหล็กเส้น 10.00 เมตร 12.00 เมตร และความยาวผสมระหว่าง 10.00 เมตร กับ 12.00 เมตร ร่วมกับรูปแบบทั้ง 3 รูปแบบ พบว่า การจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กของเสาแบบ C1-2 และใช้ความยาวเหล็กเส้น 12.00 เมตร ได้ปริมาณเหล็กน้อยที่สุดคือ 34,635 กิโลกรัม เศษเหล็กเหลือ 1,832.17 กิโลกรัม คิดเป็นอัตราส่วนเศษเหล็กต่อปริมาณการใช้เท่ากับ 5.29 จึงแสดงให้เห็นว่าการใช้ทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้น ควบคู่ไปกับการใช้ซอฟต์แวร์ BIM จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

คำสำคัญ: แบบจำลองข้อมูลอาคาร, รายการบัญชีการตัดเหล็ก, ทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้น

Abstract

The objective of this study is to apply the process of building information modeling to making a rebar cutting list. Based on linear program theory, to assist in the analysis of the amount of rebar of the column on the 4-story building project (earthquake-resistant building codes). The study starts with determining a connection pattern according to the earthquake-resistant reinforced concrete standards codes. There are 3 types: Type 1 (C1-1), a vertical steel lapping at the middle of level 2. Type 2 (C1-2), a vertical steel lapping at the middle of level 3. And Type 3 (C1-3), a vertical steel lapping at the middle of every floor. Software BIM, "Auto Desk Revit" will be generated into the Rebar cutting list. Then take the shape of bending (Rebar Number) from the rebar cutting list table was used to determine the rebar cutting parameters. To find the suitability of rebar cutting. And then divided into three groups of rebar lengths: 10 meters. 12 meters. And mixed length 10 meters. And 12 meters. Together with all 3 forms. Found that, the preparation of the list of steel cutting lists of the columns, form C1-2 uses a length of 12.00 meters of rebar, minimum output is 34,635 kilograms and scrap is 1,832.17 kilograms. The ratio of scrap to rebar is 5.29. It shows that the use of linear programming theory together with the use of BIM software, the best results are achieved.

Keywords: Building Information Modeling, Rebar cutting list, Linear Programing theory

1. บทนำ

การก่อสร้างโครงสร้างอาคารด้วยแบบจำลอง 3 มิติ ทำขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในงานก่อสร้างระหว่าง แบบสถาปัตยกรรม และ แบบวิศวกรรม เพื่อลดความเสียหาย และประหยัดเวลาในการตรวจสอบก่อนเริ่มงานจริง [1] การทำแบบจำลองโครงสร้างโดยอาศัยกระบวนการจำลองข้อมูลอาคาร (Building Information Modeling: BIM) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในยุคสมัยนี้ หาก

ผู้รับเหมาก่อสร้าง (Contractor) ได้นำกระบวนการ BIM มาใช้ในขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction Phase) ในการพัฒนาแบบสร้างจริง (Shop Drawing) หรือระดับการพัฒนาขั้น LOD300 (Level Of Development : LOD) ของกระบวนการ BIM ก็จะทำให้งบประมาณ ระยะเวลาและคุณภาพของโครงการ อยู่ในกรอบสัญญาที่ตั้งไว้ การใช้รายการบัญชีตัดเหล็ก (Rebar cutting list : Bar list) มาช่วยในการวางแผนการจัดการเศษเหล็ก จำนวนเหล็กเส้นในการสั่งแต่ละครั้ง ก็จะทำให้วิศวกรคุมงานจัดการกับเศษ

เหล็กได้ง่าย [2] และถ้าหากผู้พัฒนาแบบจำลอง (BIM Modeler) เข้าใจเทคนิคการก่อสร้าง และหลักการทางวิศวกรรม ในระดับขั้นการพัฒนา ขั้น LOD300 ก็จะสามารถให้ความเสียหาย ทั้งระยะเวลา และ ค่าใช้จ่ายลดลง [3]

แต่อย่างไรก็ตาม การทำรายการบัญชีตัดเหล็ก ที่มีในปัจจุบัน โดยส่วนใหญ่จะใช้ประสบการณ์ของช่างเหล็ก ในการตัดและตัดเหล็ก ละเลยการทำรายการบัญชีตัดเหล็กตามที่วิศวกรได้จัดทำขึ้น จึงทำให้เศษเหล็กที่เกิดขึ้นในโครงการเกินความจำเป็น โดยเฉพาะโครงการก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่ สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ปริมาณการใช้เหล็ก กับเศษเหล็กที่เหลือไม่มีความสัมพันธ์กัน เป็นเศษเหล็กที่เหลือจากการทำ Bar list มีความยาวเท่ากัน และเป็นเศษเหล็กที่สามารถนำไปใช้ในส่วนอื่น ๆ ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการตัดเหล็กอาจมีเพียงรูปแบบเดียว ขาดการจัดกลุ่มการตัดเหล็ก จึงควรกำหนดวิธีการทำในการตัดเหล็กแต่ละครั้ง ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ภายในโครงการ

สาเหตุที่เศษเหล็กเหลือเป็นจำนวนมากอาจเนื่องมาจากผู้ควบคุมงานขาดความรู้ความเข้าใจในการทำ Bar list และไม่มี การติดตามควบคุมการทำงานอย่างใกล้ชิด อีกทั้งยังขาดเครื่องมือช่วยอำนวยความสะดวกในการตัดสินใจ รวมถึงการพิจารณาความเหมาะสมในการตัดเหล็กเส้น เพื่อให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบการต่อทาบเหล็กยื่น โดยอาศัยซอฟต์แวร์ BIM (Software BIM) “Autodesk Revit” ช่วยในการจัดรูปแบบเป็นรายการบัญชีตัดเหล็ก และใช้ทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming : LP) มาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาหาความเหมาะสมจากรูปแบบการต่อทาบเหล็กยื่นต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้น เพื่อให้ได้ปริมาณเหล็กเส้น และเหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

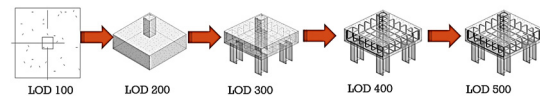
ในการศึกษาครั้งนี้มีการอ้างอิงการใช้ทฤษฎีต่าง ๆ เช่น กระบวนการแบบจำลองข้อมูลอาคาร ทำรายการบัญชีการตัดเหล็ก และทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้น ผู้ศึกษาจึงได้รวบรวมแนวคิด ทฤษฎี ต่างๆ จากเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1. แบบจำลองข้อมูลอาคาร

แบบจำลองข้อมูลอาคาร เป็นกระบวนการที่อาศัยการทำงานผ่านเทคโนโลยีระบบ Internet หรือเก็บข้อมูลไว้ในระบบ Cloud ร่วมกับซอฟต์แวร์ โดยเน้นการทำงานแบบจำลองโมเดล เป็นวัตถุ ภายในระบบจะมีค่าพารามิเตอร์ (Parametric Object-Based) ซึ่งจะเก็บข้อมูล (Data) ต่าง ๆ ในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ การทำงานจะสามารถประมวลผลได้ทั้ง ผังพื้น รูปด้าน รูปตัด ทศนิยมภาพ รวมถึงปริมาณวัสดุก่อสร้างได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบต่าง ๆ ระบบก็จะปรับเปลี่ยนให้อัตโนมัติ [4]

2.1.1. ระดับขั้นในการพัฒนาแบบ

ระดับขั้นในการพัฒนาแบบ (Level of Development : LOD) คือระดับความละเอียดในการพัฒนาแบบจำลอง ซึ่งหมายถึง เนื้อหา หรือข้อมูลที่ต้องการในแบบจำลองขององค์ประกอบแต่ละชิ้นส่วน ตามความก้าวหน้าของงานในแต่ละระดับขั้น จะแบ่ง LOD ออกเป็น 5 ระดับขั้น คือ LOD100 LOD200 LO300 LOD400 และ LOD500 [4] ดังรูปที่ 1 แสดงรายละเอียดการพัฒนาแบบจำลองฐานรากอาคาร



รูปที่ 1 รายละเอียดการพัฒนาแบบจำลองฐานรากอาคาร

LOD100 ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานการประมาณราคาโดยคิดจากปริมาณ พื้นที่ หรือ การประมาณราคาอย่างหยาบ เช่น จำนวนห้องพัก จำนวนเตียงในโรงพยาบาล

LOD200 องค์ประกอบของแบบจำลอง ถูกสร้างเป็นแบบทั่วไป โดยมี ปริมาณ ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และทิศทางแบบประมาณ ใช้สำหรับการประมาณราคาโดยคิดจากข้อมูลคร่าวๆ หรือการประมาณราคาอย่างหยาบ เช่น ปริมาตร และจำนวนขององค์ประกอบ

LOD300 องค์ประกอบของแบบจำลอง ถูกสร้างโดย เฉพาะเจาะจง มีความแม่นยำในด้าน ปริมาณ ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และทิศทาง เหมาะสำหรับการทำแบบก่อสร้าง และแบบสร้างจริง (Shop Drawing)

LOD400 องค์ประกอบของแบบจำลอง ถูกสร้างโดย เฉพาะเจาะจง มีความแม่นยำในด้าน ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง ปริมาณ และทิศทาง โดยแสดงกระบวนการผลิต การประกอบ และ ข้อมูลรายละเอียดอย่างสมบูรณ์ ใช้สำหรับการวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับการอนุมัติแล้ว

LOD500 องค์ประกอบของแบบจำลอง ถูกสร้างเช่นเดียวกับการสร้างจริง และมีความแม่นยำในด้าน ขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง ปริมาณ และทิศทาง ใช้สำหรับการบำรุงรักษาอาคาร และเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมภายหลัง

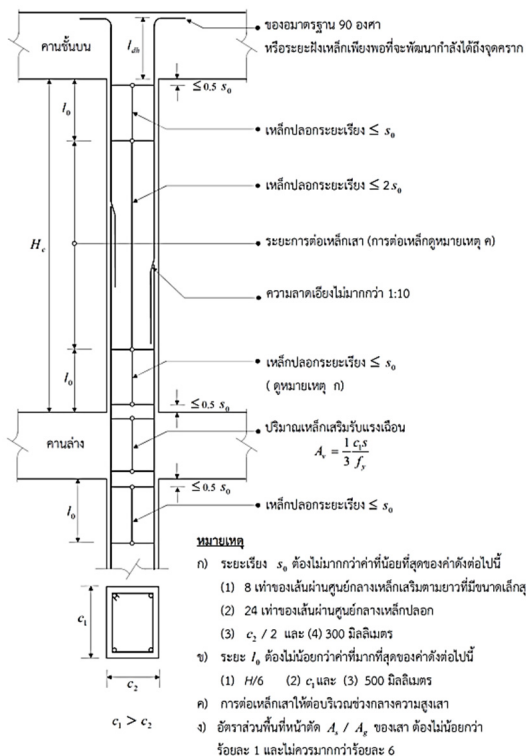
2.2. บัญชีรายการตัดเหล็ก

รายการบัญชีการตัดเหล็ก (Rebar cutting list) เป็นวางแผนการตัดเหล็กเส้น ให้ถูกต้องตามหลักการทางวิศวกรรม โดยมี วัตถุประสงค์หลักคือ สามารถระบุตำแหน่งการนำเหล็กที่ตัดไปใช้ได้ อย่างแม่นยำ ให้เศษเหล็กเหลือน้อยที่สุด โดยใช้มาตรฐานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต้านแผ่นดินไหว มยผ. 1301/1302-61

2.2.1. มาตรฐานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้าน
แผ่นดินไหว มยพ. 1301/1302-61

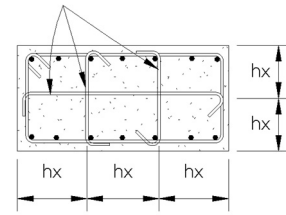
การจัดรายละเอียดเหล็กเสริมในเสา มีดังนี้ [5],[6]

- ก) การต่อทาบเหล็กยื่น จะต้องต่อภายในช่วงระยะกึ่งกลางเสาเท่านั้น ห้ามต่อทาบเหล็กภายในระยะความยาว l_0 จากข้อต่อ เสา-คาน ดังรูปที่ 2 เนื่องจากบริเวณข้อต่อเสานี้มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด
- ข) เหล็กปลอกเสริมรับแรงเฉือนมีอยู่ 2 ช่วง คือ S_0 บริเวณส่วนบนและส่วนล่างของข้อต่อเสา-คาน ภายในระยะความยาว l_0 จากผิวรอยต่อ ซึ่งจะต้องเสริมเหล็กปลอกที่ แน่นเป็นพิเศษตามข้อกำหนด และ S_c บริเวณช่วงกลางเสานอกเขตระยะความยาว l_0 ซึ่งจัดเหล็กปลอกตามแบบปกติ
- ค) สำหรับเสาภายในข้อต่อเสา-คาน จะต้องเสริมเหล็กปลอกตามข้อกำหนด ดังนี้
 - หากความกว้างของคานมากกว่าหรือเท่ากับ $\frac{3}{4}$ เท่าของความกว้างของเสา ให้จัดระยะเหล็กปลอกเป็น $2S_0$ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา สำหรับโครงสร้างที่มีความเหนียวจำกัด

เหล็กปลอกกรัดขวางจะต้องงอข้อที่ด้านตรงกันข้าม



hx จะต้องไม่เกิด 35 ซม.

รูปที่ 3 รายละเอียดเหล็กปลอกสำหรับเสา

2.3. ทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้น

โปรแกรมเชิงเส้นเป็นเทคนิคหรือเครื่องมือที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหา ด้านการบริหาร วิศวกรรม การแพทย์ ฯลฯ เป็นวิธีการที่ช่วยในการตัดสินใจ โดยเฉพาะการปฏิบัติงานด้านการก่อสร้าง มักต้องมีการเลือกตัดสินใจก่อน และหวังผลลัพธ์ในทางที่ดีที่สุด เพื่อลดความเสี่ยง โดยที่ตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้นต้องมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้นตรง (All linear function) จะต้องมีการประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้ [7]

2.3.1. เป้าหมายของปัญหา (OBJECTIVE FUNCTION)

เป็นเป้าหมายที่ต้องการให้บรรลุผลสำเร็จโดยทั่วไปเป้าหมายของปัญหาเรียกว่า objective โดยลักษณะความต้องการของเป้าหมายสองแบบ คือต้องการ ค่าสูงสุด (maximum) และค่าต่ำสุด (minimum) เช่น ต้องการให้ได้กำไรสูงสุด ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ใช้เวลาน้อยสุด ใช้เงินลงทุนต่ำสุด [8]

2.3.2. สมการแสดงข้อจำกัด (CONSTRAINTS)

การแสดงข้อจำกัดต่าง ๆ ของปัจจัย หรือทรัพยากรในรูปแบบการหรือสมการโดยที่สมการต่าง ๆ ทั้งหมดเป็นสมการเชิงเส้น เมื่อเทียบกับตัวแปร

$$\text{Minimum } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (1)$$

Constraint เงื่อนไข ขอบเขต

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 \dots a_{1n}X_n \geq b_1 \quad (2)$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 \dots a_{2n}X_n \geq b_n \quad (3)$$

อยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0 \quad (4)$$

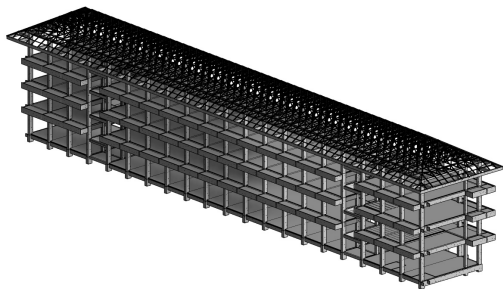
- x_j คือรูปแบบการตัดเหล็ก ซึ่งต้องการหาค่า
- c_j คือ ต้นทุนของการตัดเหล็ก จะมีค่าคงที่
- a_{ij} คือ จำนวนชิ้นส่วนความยาวเหล็ก i ใช้ในการตัดที่ j
- b_i คือ จำนวนที่ต้องการของแต่ละขนาดเหล็ก i

3. กรอบงานการทำรายการบัญชีการตัดเหล็ก

กรอบงาน (Frame work) การทำรายการบัญชีตัดเหล็ก เริ่มจากการศึกษาารูปแบบและรายการของโครงการ กำหนดรูปแบบการต่อทาบเหล็กยื่น ตามมาตรฐานทางวิศวกรรม เช่น มาตรฐาน มยผ. มาตรฐาน วสท. ด้วยซอฟต์แวร์บิม จากนั้นพิจารณาปริมาณเหล็กเสริมที่ได้จากการประมวลผลของซอฟต์แวร์บิม แล้วนำมาสร้างแบบจำลองความเหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1. ศึกษาารูปแบบและรายการของโครงการ

การศึกษาารูปแบบและรายการของโครงการ ในการศึกษานี้ได้ใช้รูปแบบและรายการอาคารเรียน 324ล-55-ข. ของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) ซึ่งเป็นอาคารที่มีลักษณะโครงสร้างการต้านแผ่นดินไหว ดังรูปที่ 4

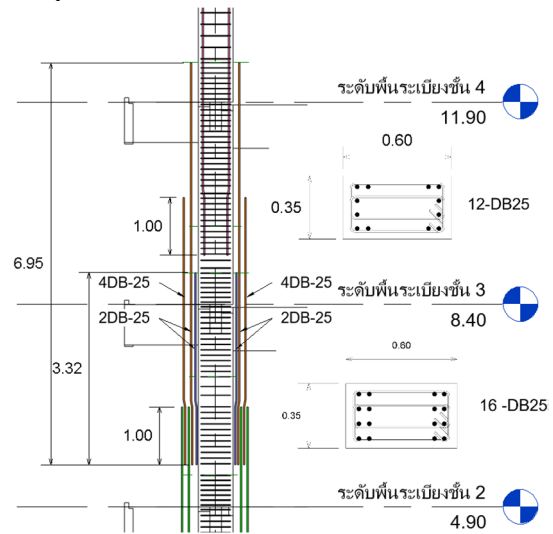


รูปที่ 4 แบบจำลองโครงสร้างอาคารเรียน 4 ชั้น 324ล-55ข

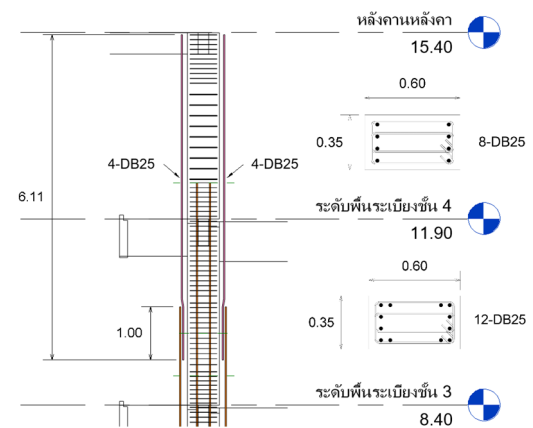
โดยแบบจำลองโครงสร้างอาคารมีรายละเอียด และลักษณะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 รูปแบบ ได้แก่ C1, C2, C3, C4 และ C5 โดยการศึกษาจะยกตัวอย่างของเสา C1 จำนวนทั้งหมด 30 ต้น จากเสาทั้งหมด 40 ต้น มาสร้างแบบจำลอง (Modeling) และป้อนข้อมูลปริมาณเหล็กเส้น (Information) ตามมาตรฐานการต่อทาบเหล็กยื่นลงในแบบจำลอง เพื่อหาปริมาณเหล็กและเศษเหล็กภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน สพฐ. โดยมีขั้นตอนต่อไปนี้

3.2. การกำหนดรูปแบบต่อทาบเหล็กยื่น มาตรฐาน สพฐ.

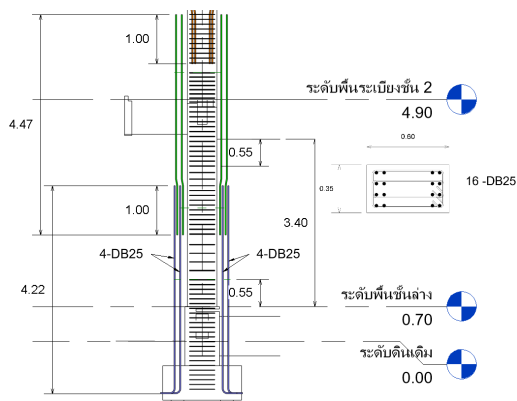
ศึกษาข้อมูลตำแหน่งเสริมเหล็ก รูปแบบและการจัดจอบ ทาบเหล็ก และระยะต่อทาบเหล็กยื่น ตามแบบข้อกำหนดของ สพฐ. อาคารต้านแผ่นดินไหว รูปที่ 2 ที่มีตำแหน่งกำหนดระยะการต่อทาบเหล็กบริเวณกึ่งกลางเสา เพื่อทำการสร้างรูปแบบ การต่อทาบเหล็กยื่น ที่เป็นไปได้ภายใต้มาตรฐานกำหนด ของเสา C1 โดยมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 (C1-1) การต่อทาบเหล็กยื่นกึ่งกลางชั้น 2 รูปแบบที่ 2 (C1-2) การต่อทาบเหล็กยื่นกึ่งกลางชั้น 3 รูปแบบที่ 3 (C1-3) การต่อทาบเหล็กยื่นกึ่งกลางทุกชั้น ดังรูปที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 5 รูปแบบที่ 1 (C1-1) การต่อทาบเหล็กยื่นกึ่งกลางชั้น 2



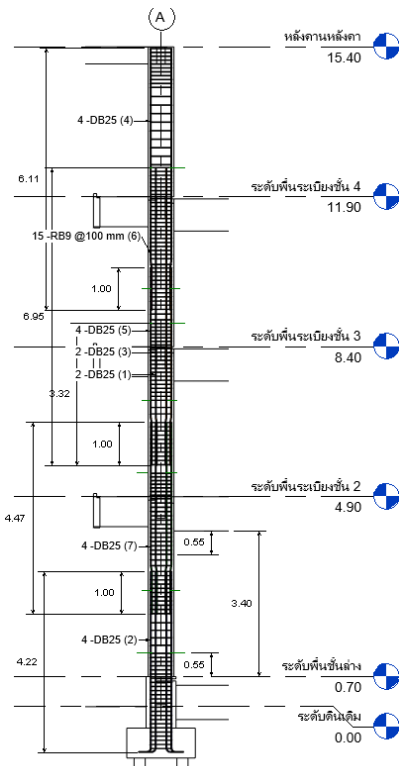
รูปที่ 6 รูปแบบที่ 2 (C1-2) การต่อทาบเหล็กยื่นกึ่งกลางชั้น 3



รูปที่ 7 รูปแบบที่ 3 (C1-3) การต่อทาบเหล็กยื่นกึ่งกลางทุกชั้น

3.3. พิจารณาปริมาณเหล็กจากซอฟต์แวร์ BIM

ซอฟต์แวร์ BIM (Software BIM) จะทำการประมวลผลออกมาเป็นตารางบัญชีตัดเหล็ก ซึ่งประกอบด้วยรูปร่างการตัดเหล็ก จำนวนเหล็ก ความยาวเหล็ก ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้ผู้เขียนแบบจำลองอาคาร (BIM Modeler) เป็นผู้พัฒนาขึ้นตามหลักการทางวิศวกรรม และมาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ในกรณีนี้จะใช้เสา C1-3 มาเป็นตัวอย่งในการถอดปริมาณเหล็ก ด้วยโปรแกรม Autodesk Revit 2021 ดังรูปที่ 8 และจะถูกส่งไปให้กับผู้ควบคุมงานก่อสร้างพิจารณาจัดการเศษเหล็ก ดังตารางที่ 1



Bar Cut List C1 รูปแบบที่ 3												
Partition	Bar Diameter	Rebar Number	Shape Image	A	B	C	D	E	F	G	Bar Length	Quantity
C1-รูปแบบที่ 3	9 mm	6		0.08 m	0.20 m	0.52 m	0.20 m	0.52 m	0.00 m	0.08 m	1.54 m	308
C1-รูปแบบที่ 3	25 mm	1		1.00 m	0.12 m	2.22 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	3.32 m	4
C1-รูปแบบที่ 3	25 mm	2		0.30 m	4.22 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	4.46 m	16
C1-รูปแบบที่ 3	25 mm	7		1.00 m	0.14 m	3.34 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	4.48 m	16
C1-รูปแบบที่ 3	25 mm	5		1.00 m	0.14 m	3.49 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	4.62 m	8
C1-รูปแบบที่ 3	25 mm	4		1.00 m	0.15 m	4.97 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	6.12 m	8
C1-รูปแบบที่ 3	25 mm	3		1.00 m	0.12 m	5.85 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	0.00 m	6.95 m	4

1 C1-รูปแบบที่ 3
1 : 75

รูปที่ 8 ซอฟต์แวร์ BIM ประมวลผลเป็นตารางบัญชีตัดเหล็ก ของเสา C1-3

ตารางที่ 1 การจัดการเศษเหล็กจากประสบการณ์ของผู้ควบคุมงาน

รหัสเหล็ก	ขนาดเหล็ก (มม.)	ความยาวเหล็กต่อท่อน	เสา C1-3 (1 ต้น)			จำนวนเสา C1-3 (30 ต้น)			การจัดการเศษเหล็ก	
			จำนวนท่อนที่ต้องการ	จำนวนเหล็กเส้นที่ใช้	เศษเหล็กเมตร (ท่อน)	จำนวนท่อนที่ต้องการ	จำนวนเหล็กเส้นที่ใช้	เศษเหล็กเมตร (ท่อน)	การนำไปใช้	เศษเหล็กเมตร (ท่อน)
RN6	9	1.54	308	52	0.76 (51) 6.9 (1)	9240	1540	0.76 (1540)	-	0.76 (1,540)
RN1	25	3.32	4	4	2.04 (1) 8.68 (1)	120	40	2.04 (40)	-	2.04 (40)
RN2	25	4.46	16	8	3.08 (8)	480	240	3.08 (240)	-	3.08 (240)
RN7	25	4.48	16	8	3.04 (8)	480	240	3.04 (240)	-	3.04 (180)
RN5	25	4.62	8	4	2.76 (4)	240	120	2.76 (120)	-	-
RN4	25	6.12	8	8	5.88 (8)	240	240	5.88 (240)	นำเศษไปใช้กับ RN5	1.26 (240)
RN3	25	6.95	4	4	5.05 (4)	120	120	5.05 (120)	นำเศษไปใช้กับ RN7	0.57 (120)
รมน้ำหนักเหล็ก (กก.)				1,924.41	555.26		53,932.6	15,610		7,285.37

3.4. การสร้างแบบจำลองความเหมาะสม

การสร้างแบบจำลองความเหมาะสม ด้วยทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้น มีขั้นตอนในการสร้างแบบปัญหาสองขั้นตอนที่สำคัญ คือ การพิจารณาจากรูปแบบการตัดเหล็ก การพิจารณาเงื่อนไขการหาจำนวนรูปแบบการตัดเหล็ก และเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละรูปแบบ

3.4.1. การพิจารณาจากรูปแบบการตัดเหล็ก

โดยเริ่มจากการสร้างตารางที่ประกอบด้วย ความยาว จำนวน และ รูปแบบวิธีการตัดเหล็กเส้น 12 เมตร ยกตัวอย่างกรณีศึกษาของเสา C1-3 จะมีรูปแบบ 6 ตัวแปร ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$) ซึ่งรูปแบบวิธีการตัดเหล็ก ในแต่ละรูปแบบจะพิจารณาจากกลุ่มความยาวเหล็กที่รวมกันแล้วมีความยาวเหล็กไม่เกิน 12 เมตร ยกตัวอย่างเช่นรูปแบบที่ x_1 ตัดความยาวเหล็กที่ 6.95 เมตร (Rebar Number : RN14) เป็นความยาวเหล็กที่ได้ Autodesk Revit ในกรณีนี้จะเหลือเศษเหล็ก 5.05 เมตร จำนวน 4 ท่อน นำเศษที่เหลือไปยังความยาวเหล็กที่ต้องการ 4.62 เมตร (Rebar Number : RN12) จะเหลือเศษ 0.04 เมตร ดังตารางที่ 2 และรูปแบบตัวอย่างการจัดกลุ่มเหล็กทั้ง 3 รูปแบบ ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การพิจารณาจากรูปแบบการตัดเหล็กเป็นกลุ่มของเสา C1-3 กึ่งกลางเสาทุกชั้น สำหรับเหล็กขนาด DB25 ที่ความยาวไม่เกิน 12 เมตร

ความยาว	จำนวน	รูปแบบวิธีการตัดเหล็ก					
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
6.95	4	1	-	-	-	-	-
6.12	8	-	-	1	1	-	-
4.62	8	1	1	1	-	-	-
4.48	16	-	-	-	1	2	-
4.46	16	-	-	-	-	-	2
3.32	4	-	2	-	-	-	-
ความยาวรวม		11	11	10	10	8.9	8.9
เหลือเศษ		1	1	2	2	3.1	3.1
รวม		12	12	12	12	12	12

ตารางที่ 3 ตัวแปรที่ใช้เหล็กเส้นข้ออ้อยที่ความยาว 12 เมตร ของเสา C1 ทั้ง 3 รูปแบบการตัดเหล็ก

ความยาว	จำนวน	รูปแบบวิธีการตัดเหล็ก													
		C1-1				C1-2				C1-3					
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
12	12	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.74	8	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.94	16	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6.95	4	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
6.78	4	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
6.37	4	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
6.12	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-
5.92	8	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-
4.62	8	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-
4.48	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	-
4.46	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
3.32	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-
2.87	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.55	4	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-
ความยาวรวม		9.74	10.81	7.94	6.37	12.00	9.33	11.84	6.37	11.57	11.2	10.74	10.6	8.96	8.92
เหลือเศษ		2.26	1.19	4.06	5.63	0	2.67	0.16	5.63	0.43	0.74	1.26	1.4	3.04	3.08
รวม		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

3.4.2. การสร้างเงื่อนไขสมการด้วยโปรแกรมเชิงเส้น

การสร้างเงื่อนไขช่วยในการตัดสินใจ เพื่อหวังผลลัพธ์ในทางที่ดีที่สุด สำหรับการวิจัยครั้งนี้สมการเป้าหมาย คือการใช้ปริมาณเหล็กน้อยที่สุด และให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด (minimum)

เขียนเงื่อนไขในรูปสมการของเสา C1-3 มีเป้าหมายคือหาจำนวนการใช้เหล็กเส้นตัดแล้วให้เหลือเศษน้อยที่สุด ซึ่งรูปแบบการตัดเหล็กในหนึ่งหน่วยใช้ต้นท่อน (C) เหล็ก 1 เส้น ยาว 12 เมตร ตัวแปร (X) มาจากข้อมูลการจัดรูปแบบการตัดเหล็กที่ได้จาก ตารางที่ 3 โดยมี 6 ตัวแปร (x₁, x₂, x₃, x₄, x₅, x₆) และมีขอบเขตของเงื่อนไขคือจำนวนท่อนที่ต้องการ (b) ของแต่ละความยาวของเสา C1-3 ซึ่งได้จากการถอดปริมาณเหล็ก เช่น ความยาว 6.95 ต้องการ 4 ท่อนอยู่ในรูปแบบ x₁ จะได้ x₁ ≥ 4 ลงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การพิจารณาในรูปแบบ C1-3 เฉพาะเหล็กขนาด DB25

สมการเป้าหมาย			
Minimize	Z = 1x ₁ + 1x ₂ + 1x ₃ + 1x ₄ + 1x ₅ + 1x ₆		
ข้อจำกัด			
ความยาว	รูปแบบและขอบเขต	ความยาว	รูปแบบและขอบเขต
6.95	x ₁ ≥ 4	4.48	x ₄ + 2x ₅ ≥ 16
6.12	x ₁ + x ₂ ≥ 8	4.46	2x ₆ ≥ 16
4.62	x ₁ + x ₂ + x ₃ ≥ 8	3.32	2x ₂ ≥ 4
ตัวแปรที่ไม่เป็นลบ	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₆		

3.4.3. เปรียบเทียบการใช้ความยาวเหล็กเส้นและรูปแบบการต่อทาบเหล็กยื่น

ทุกรูปแบบจะกำหนดให้เหล็กกลม (Round Bar : RB) มีความยาวที่ 10 เมตร และข้ออ้อยที่ 10 และ 12 เมตร โดยเปรียบเทียบตารางข้อมูลการใช้เหล็กเส้น ดังนี้ 1.) เหล็กข้ออ้อย 10 เมตร 2.) เหล็กข้ออ้อย 12 เมตร และ 3.) เหล็กข้ออ้อย 10+12 เมตร ดังตารางที่ 5, 6, 7 ตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับโดยมีรูปแบบการต่อทาบเหล็กทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ 1). หยุดทาบกึ่งกลางชั้น 2, 2). หยุดทาบกึ่งกลางชั้น 3, 3). หยุดทาบกึ่งกลางทุกชั้น เนื่องจากรูปแบบที่ 2 เป็นรูปแบบที่ใช้เหล็กยาว 12 เมตร ทำให้ไม่มีข้อมูลในตารางที่ 5 การใช้เหล็กเส้นความยาว 10 เมตร

		เหล็กเส้นความยาว 10 เมตร					
ขนาดเหล็ก	รูปแบบที่ 1		รูปแบบที่ 2		รูปแบบที่ 3		
	ใช้	เศษ	ใช้	เศษ	ใช้	เศษ	
	เหล็ก	เหลือ	เหล็ก	เหลือ	เหล็ก	เหลือ	
	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	
RB9	234	19.5	-	-	259	21.3	
DB25	1079	140.3	-	-	1233	184	
รวม	1313	159.8	-	-	1492	206	

ตารางที่ 6 การใช้เหล็กเส้นความยาว 12 เมตร

		เหล็กเส้นความยาว 12 เมตร					
ขนาดเหล็ก	รูปแบบที่ 1		รูปแบบที่ 2		รูปแบบที่ 3		
	ใช้	เศษ	ใช้	เศษ	ใช้	เศษ	
	เหล็ก	เหลือ	เหล็ก	เหลือ	เหล็ก	เหลือ	
	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	
RB9	234	19.5	229	16.1	259	21.3	
DB25	1294	356.1	924	42.4	1248	203	
รวม	1529	375	1154	58	1508	224	

ตารางที่ 7 การใช้เหล็กเส้นความยาว 12 และ 10 เมตร

		เหล็กเส้นความยาว 12 เมตร และ 10 เมตร					
ขนาดเหล็ก	รูปแบบที่ 1		รูปแบบที่ 2		รูปแบบที่ 3		
	ใช้	เศษ	ใช้	เศษ	ใช้	เศษ	
	เหล็ก	เหลือ	เหล็ก	เหลือ	เหล็ก	เหลือ	
	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	
RB9	234	19.5	229	16.1	259.4	21.3	
DB25 (10)	1079	140	-	-	770.8	64.7	
DB25 (12)	-	-	1154	42.4	369.9	29.2	
รวม	1313	159	1154	58	1400	115	

จากการเปรียบเทียบการใช้เหล็กเส้นความยาว 10 เมตร 12 เมตร และ ความยาวผสมระหว่าง 10 เมตร และ 12 เมตร ร่วมกับรูปแบบการต่อทาบเหล็กยื่นทั้ง 3 รูปแบบ พบว่า ปริมาณการใช้เหล็ก และเศษเหล็กเหลือ มีความต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ โดยการใช้เหล็กเส้นความยาว 10 เมตร รูปแบบของเสา C1-3 จะมีเศษเหล็กเหลือมากที่สุด การใช้เหล็กเส้นความยาว 12 เมตร รูปแบบ C1-2 จะมีการใช้เหล็กเส้นและการเหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด และสุดท้ายการใช้เหล็กเส้นความยาวผสมระหว่าง 10 เมตร และ 12 เมตรนั้นรูปแบบ C1-1 จะมีการเหลือเศษเหล็กมากที่สุด แต่การใช้เหล็กเส้นนั้นจะน้อยกว่ารูปแบบ C1-3 ถึงแม้เศษเหล็กจะเหลือน้อย แต่การใช้เหล็กเส้นก็มีจำนวนมาก จึงไม่เป็นการประหยัด แสดงให้เห็นว่ารูปแบบตำแหน่งการตัดเหล็กและการใช้ขนาดของเหล็กเส้นมีผลต่อการเหลือเศษเหล็กเป็นอย่างมาก จึงแสดงให้เห็นว่าวิศวกรควบคุมงานต้องเข้าใจถึงการต่อทาบเหล็กยื่น รวมถึงการใช้ความยาวเหล็กเส้น เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

4. การประยุกต์ใช้งานในโครงการ

การคำนวณผลลัพธ์ทฤษฎีโปรแกรมเส้นเชิง ด้วยโปรแกรม "Realcut1D" ใช้ในการช่วยสร้างสมการตัวแปรรูปแบบการตัดเหล็ก เพื่อหาเศษเหล็กเส้นน้อยที่สุดด้วยความยาวของเหล็กเส้น ทั้ง 3 รูปแบบ จึงได้สมการตัวแปรออกมา พร้อมทั้งนำข้อมูลที่ได้ทั้ง 3 รูปแบบมาทำการเปรียบเทียบกับหน้างานก่อสร้างเพื่อหาความต่างของทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้นและปฏิบัติ

การเปรียบเทียบการตัดเหล็กเส้นจากการจัดรูปแบบด้วยประสบการณ์ของวิศวกรควบคุมงาน ที่มีการจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก มาเปรียบเทียบกับการใช้ทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้น ของเสา C1 ทุกรูปแบบ ดังตารางที่ 8, 9, 10 ตามลำดับ ต่อไปนี้

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบระหว่างการจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กและไม่จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กของเสา C1-1 จำนวน 30 ต้น ความยาวเหล็ก 12

ขนาด	ไม่จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก			จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก ตามหลักการฮิวริสติก			จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก ตามหลักการโปรแกรมเชิงเส้น		
	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)
RB9	6,936.1	527.14	7.59	6,936.1	527.14	7.59	6,936.1	527.14	7.59
DB25	40,235.76	12,283.47	30.53	38,848.32	10,896.03	28.05	38,848.32	10,877.53	28.00
รวม	47,171.86	12,810.61	27.16	45,784.42	11,423.17	24.95	45,784.42	11,404.67	24.91

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบระหว่างการจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กและไม่จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กของเสา C1-2 จำนวน 30 ต้น ความยาวเหล็ก 12

ขนาด	ไม่จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก			จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก ตามหลักการฮิวริสติก			จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก ตามหลักการโปรแกรมเชิงเส้น		
	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)
RB9	6,886.2	523.35	7.59	6,886.2	523.35	7.59	6,886.2	523.35	7.59
DB25	29,136.24	2,696.26	9.25	27,748.8	1,308.82	4.72	27,748.8	1,308.82	4.72
รวม	36,022.44	3,219.61	8.93	34,635	1,832.17	5.29	34,635	1,832.17	5.29

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบระหว่างการจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กและไม่จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กของเสา C1-3 จำนวน 30 ต้น ความยาวเหล็ก 12

ขนาด	ไม่จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก			จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก ตามหลักการฮิวริสติก			จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก ตามหลักการโปรแกรมเชิงเส้น		
	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)	ใช้เหล็ก (L) (กก.)	เศษเหล็ก (R) (กก.)	อัตราส่วน R/L (%)
RB9	7,684.6	584.03	7.60	7,684.6	584.03	7.60	7,684.6	584.03	7.60
DB25	46,248	15,025.98	32.50	37,923.36	6,701.335	17.67	37,460.88	6,104.74	16.30
รวม	53,932.6	15,610	28.94	45,607.96	7,285.36	15.97	45,145.48	6,642.66	14.71

จากการศึกษาการไม่จัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก และจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กตามหลักการฮิวริสติก และ ตามหลักการโปรแกรมเชิงเส้น พบว่าการจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กของเสาแบบ C1-1 ใช้ความยาวเหล็กเส้น 12.00 เมตร ตามหลักการโปรแกรมเชิงเส้น ได้ปริมาณการใช้เหล็กน้อยที่สุดคือ 45,784.42 กิโลกรัม เศษเหล็กเหลือ 11,404.67 กิโลกรัม คิดเป็นอัตราส่วนเศษเหล็กต่อปริมาณการใช้เท่ากับ 24.91 (ตารางที่ 8) การจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กของเสาแบบ C1-2 และใช้ความยาวเหล็กเส้น 12.00 เมตร ได้ปริมาณเหล็กน้อยที่สุดคือ 34,635 กิโลกรัม เศษเหล็กเหลือ 1,832.17 กิโลกรัม คิดเป็นอัตราส่วนเศษเหล็กต่อปริมาณการใช้เท่ากับ 5.29 (ตารางที่ 9) การจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็กของเสาแบบ C1-3 และใช้ความยาวเหล็กเส้น 12.00 เมตร ได้ปริมาณเหล็กน้อยที่สุดคือ 45,145.48 กิโลกรัม เศษเหล็กเหลือ 6,642.66 กิโลกรัม คิดเป็นอัตราส่วนเศษเหล็กต่อปริมาณการใช้เท่ากับ 14.71 (ตารางที่ 10) จะเห็นว่าจัดทำบัญชีรายการตัดเหล็ก

ตามหลักการโปรแกรมเชิงเส้น ให้ปริมาณเหล็กที่ใช้ และเศษเหล็กเหลือน้อยที่สุดทั้ง 3 รูปแบบ

5. บทสรุป

ผลการศึกษาพบว่า การบริหารเศษเหล็กจากงานก่อสร้าง ควรมีการวางแผนตำแหน่งการต่อทาบเหล็กการทำบัญชีรายการตัดเหล็ก ซึ่งมีผลกระทบต่อการใช้เส้นเหล็กและเศษเหล็กในโครงการงานก่อสร้าง โดยการวางแผนรายการบัญชีรายการตัดเหล็ก ควรมีการคำนึงถึงโอกาสที่เป็นไปได้ในงานก่อสร้างหลากหลายรูปแบบ เพื่อหารูปแบบที่ดีที่สุด ง่ายต่อการทำงาน ทั้งนี้ในการจัดรูปแบบการตัดเหล็กในงานก่อสร้างที่มีความหลากหลายมากมายน่าจะต้องมีตัวช่วยในการตัดสินใจให้แก่ผู้ปฏิบัติงานก่อสร้างที่จะสร้างรูปแบบการจัดการตัดเรียงเหล็กเห็นเหมาะสมที่สุด ด้วยโปรแกรมของ “Realcut1D” เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยในการบริหารการใช้เหล็กเส้นและการเหลือเศษเหล็กด้วยหลักการทฤษฎีโปรแกรมเชิงเส้น

โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการทดสอบทำจริงในภาคสนาม เพื่อให้ทราบถึงความยากง่ายละความเป็นได้ที่จะทำงานทั้ง 3 รูปแบบ เพื่อที่จะทำให้เป็นไปได้ตามแผนที่วางไว้ต้องมีเงื่อนไข ดังนี้ คือ 1.) ต้องมีเครื่องในการช่วยยกเหล็ก 2.) ต้องมีพื้นที่ที่รองรับ 3.) พื้นที่จัดวางเหล็กเพื่อประกอบ 4.) ต้องมีอุปกรณ์เครื่องตัดและตัดเหล็ก 5.) แรงงานต้องมีทักษะเข้าใจถึงรูปแบบการตัดและตัดเหล็ก และ 6.) ต้องมีวิศวกรคอยควบคุมและตรวจสอบการทำ Bar Cut list

การวางแผนการต่อทาบเหล็ก ด้วยแบบจำลองข้อมูลอาคารสารสนเทศ เป็นการจำลองในรูปแบบ 2 และ 3 มิติ ทำให้เห็นภาพก่อนงานก่อสร้างจริง ทำให้เหมาะแก่การวางแผนตำแหน่งต่อทาบเหล็กได้อย่างแม่นยำ เพื่อในแผนการตัดเหล็กที่วางไว้เป็นไปได้ตามจริงที่สุด แต่ยังคงขาดการคำนึงถึงที่จัดเก็บ

6. การอ้างอิง

- [1] คชาวุฒิ ลิ้มพงษ์ (2017). การเปรียบเทียบการใช้โปรแกรมเขียนแบบสองมิติและวิธีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) มาใช้ในการเขียนแบบก่อสร้างร้านค้าปลีกในประเทศไทย, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาการจัดการงานวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
- [2] R., Navon, A., Shapira, and Y., Shechori. (2000). Automated Rebar Constructability Diagnosis, Journal of Construction Engineering and Management Vol. 126, Issue 5
- [3] สันติ ชินานูวัตินวงศ์. (1989). “การควบคุมการสูญเสียเหล็กเสริม คอนกรีตในโครงการก่อสร้าง” วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] สถาบันสถาปนิกสยาม. สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์. (2558) แนวทางการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคาร สำหรับประเทศไทย (Thailand BIM Guideline) พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : บริษัท พลัสเพรส จำกัด
- [5] ไพบุลย์ ปัญญาคะโป (2561) การออกแบบโครงสร้างอาคารต้านทานแผ่นดินไหว. เอ็ม แอนด์ เอ็ม เลเซอร์พริ้นต์ หน้า 254-257
- [6] วินิต ช่อวีเชียร, วรนิติ ช่อวีเชียร (2554) การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. วรนิติช่อวีเชียร หน้า 50-58
- [7] H.I. Calvete, C. Gale. (1999). “Theory and Methodology: The bilevel linear/linear fractional programming problem.” European Journal Operational Research, 114, 188–197.
- [8] ศรายุทธ มาลัย. (2010). การประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นตรงสำหรับการควบคุมการตัดเหล็กรูปพรรณ, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 21 ฉบับที่ 3
- [9] Issam M. Srour, Carl T. Haas, David P. Morton (2006) Linear Programming Approach to Optimize Strategic Investment in the Construction Workforce. Journal of Construction Engineering and Management Vol. 132, Issue 11
- [10] O. Mosehli, F.ASCE, A. Hassanein (2003) Optimized Scheduling of Linear Projects. Journal of Construction Engineering and Management Vol. 129, Issue 6
- [11] Amit Armstrong, Michael Flood, Michael Meyer (2014) Development of Adaptation Framework for Climate Change Engineering Assessment of Transportation Assets. International Conference on Sustainable Infrastructure November 6-8, Long Beach, California
- [12] Gregory A. Duffy, Garold D. Oberlender, and David Hyung Seok Jeong, A.M.ASCE (2011) Linear Scheduling Model with Varying Production Rates. Journal of Construction Engineering and Management Vol. 137, Issue 8
- [13] Santu Kar, Chirag Kothari, and Kumar Neeraj Jha, Ph.D. (2021) Developing an Optimum Material Procurement Schedule by Integrating Construction Program and Budget Using NSGA-II Journal of Construction Engineering and Management Vol. 147, Issue 4