

การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้ เหลือเศษน้อยที่สุด

Application of Building Information Modeling to Analyze Rebar Cutting Patterns with Minimum Waste

ณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว¹, วิทยา ศรีสมบุญ^{2,*} และ นุชิดา เพ็ชรเทศ³

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา พังงสุขลา ศรีราชา ชลบุรี 20230

²คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เชียงเคือง

เมืองสกลนคร สกลนคร 47000

³บริษัท 프리สเตรสซิ่ง เทคนิค (ประเทศไทย) จำกัด ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Narongrit Wongwai¹, Wittaya Srisomboon^{2,*} and Nuthida Phetthet³

¹Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Thung Sukhla, Sriracha,
Chonburi, 20230, Thailand

²Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus, Chiang
Khruca, Mueang Sakon Nakhon, Sakon Nakhon, 47000, Thailand

³Prestressing Technique (Thailand) Company Limited, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding Author E-mail: fsewys@ku.ac.th

Received: Aug 18, 2021; **Revised:** Oct 18, 2021; **Accepted:** Oct 19, 2021

บทคัดย่อ

ปัญหาที่พบในงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กคือปริมาณเศษเหล็กที่สูงเสียเป็นจำนวนมากจากการใช้รูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่ไม่มีประสิทธิภาพส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของโครงการสูงขึ้นและการขาดดุลทางเศรษฐกิจของประเทศจากการนำเข้าเหล็กเส้นที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี งานวิจัยนี้นำเสนอการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นจากแบบจำลองสารสนเทศอาคารกับแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษน้อยที่สุด การศึกษาแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือส่งออกข้อมูลเหล็กเส้นจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ขั้นตอนที่สองคือการวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษน้อยที่สุด และขั้นตอนที่สามคือการนำข้อมูลการตัดเหล็กเส้นกลับเข้าสู่พารามิเตอร์ของชิ้นส่วนแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมก่อสร้างในด้านการช่วยลดปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากกระบวนการตัดให้น้อยลง ส่งผลให้การใช้ทรัพยากรมีประสิทธิภาพมากขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้าง ผลของจำนวนเศษเหล็กเส้นที่น้อยลงยังช่วยลดปัญหาขยะที่เกิดขึ้นจากงานก่อสร้างและปัญหาการขโมยเศษเหล็กเส้นโดยคนงานก่อสร้าง นอกจากนี้งานวิจัยนี้มีความสำคัญทางวิชาการในแง่การพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถค้นหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากการตัดได้มากขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยสามารถใช้คำนวณปัญหาที่มีเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดหลายความยาว และการเชื่อมโยงข้อมูลการตัดเหล็กเส้นกลับไปยังกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารทำให้ลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการทำงาน

คำสำคัญ: อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, เศษเหล็กน้อยที่สุด, แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น

Abstract

The problem encountered in constructing reinforced concrete buildings is a large amount of rebar scrap wasted due to the inefficient use of rebar cutting patterns. As a result, the project costs are higher, and the country's economic deficit from rebar imports increases each year. This study presents the interconnection of two data sources, Building Information Modeling (BIM) and Linear Programming Model, to analyze and find effective rebar cutting patterns to minimize rebar waste and cost. Rebar data from BIM was exported and analyzed the cutting pattern to minimize the scrap. Later the rebar cutting data were imported into the parameters of BIM elements. The results from the study showed that rebar scraps were successfully reduced from the cutting process. This study had at least two significances. In terms of construction, it effectively used resources, reduced the construction cost, and avoided the rebar waste smuggling problem from the construction site. In terms of educational value, this study can also be used to calculate standard length rebar, which is cut into several lengths. In addition, importing the cutting data back to the BIM model can reduce the time and mistakes in the operation.

Keywords: Reinforced Concrete Buildings, Minimum Rebar Waste, Building Information Modeling, Linear Programming Model

1. บทนำ

ปัญหาใหญ่ที่พบในงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กคือโครงสร้างมักถูกออกแบบให้ใช้เหล็กเส้นที่มีหลายขนาดความยาว ซึ่งต้องสั่งซื้อเหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน (เหล็กเส้นยาว 10 หรือ 12 เมตร) มาตัดตามความยาวที่ต้องการ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เหลือเศษเหล็กจากการตัดเป็นจำนวนมากอันส่งผลกระทบให้ค่าใช้จ่ายของโครงการสูงขึ้น นอกจากนี้การปฏิบัติงานจริงของโครงการก่อสร้างในประเทศไทยส่วนใหญ่จะให้ช่างเหล็กเป็นผู้รับผิดชอบในการวางแผนการตัดเหล็กเส้นแทนวิศวกรโครงการ ดังนั้นประสิทธิภาพของแผนการตัดเหล็กเส้นจึงขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของช่างเหล็กเป็นหลัก ซึ่งการวางแผนตัดเหล็กเส้นในงานก่อสร้างให้เหลือเศษน้อยที่สุดเป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อนสูง หากวางแผนไม่ดีจะส่งผลให้เหลือเศษเหล็กที่ไม่สามารถใช้ในโครงสร้างต่อไปได้ แม้ว่าปริมาณการใช้เหล็กในอุตสาหกรรมก่อสร้างจะปรับตัวลดลงจากผลกระทบของสถานการณ์ระบาดของโควิด-19 แต่กระนั้นข้อมูลในปี 2563 ยังแสดงให้เห็นว่าอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทยใช้ปริมาณเหล็กเส้นสูงถึง 3.74 ล้านตัน และมีสัดส่วนการนำเข้าสูงถึงร้อยละ 63.14 [1] จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากการตัดโดยทั่วไปคิดเป็นร้อยละ 8.9 [2] และโครงการก่อสร้างที่มี

ระบบควบคุมการตัดเหล็กเส้นที่ดีสามารถลดปริมาณเศษเหล็กเส้นเหลือเพียงร้อยละ 6 [2] หากคิดปริมาณเศษเหล็กเส้นร้อยละ 5 จะมีปริมาณสูงถึง 1.87 แสนตันต่อปี เมื่ออ้างอิงข้อมูลราคาต่อหน่วยของเหล็กเส้นเฉลี่ย 20,000 บาท ต่อตันปี จากกรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์ จะส่งผลให้มีมูลค่าความสูญเสียจากปริมาณเศษเหล็กสูงถึง 3,740 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นหากสามารถลดปริมาณเศษเหล็กดังกล่าวจะช่วยให้ประเทศไทยลดการนำเข้าเหล็กเส้นได้ถึง 1.18 ล้านตันต่อปี คิดเป็นมูลค่าการขาดดุลทางเศรษฐกิจที่ลดลงได้ถึง 2,360 ล้านบาทต่อปี

ปัญหาการตัดเหล็กเส้นในงานก่อสร้างให้เหลือเศษน้อยที่สุดจัดอยู่ในรูปแบบปัญหาการตัดวัสดุคงคลังแบบหนึ่งมิติ (One-Dimensional Cutting Stock Problem) ซึ่งเป็นที่สนใจในการวิจัยอย่างต่อเนื่องมานานหลายทศวรรษซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองแนวทางประกอบด้วย 1.แนวทางการตัดทีละชิ้น (Item-Oriented Approach) โดยพิจารณาการตัดวัสดุทีละชิ้นเรียงตามความยาวที่ต้องการ [3],[4] และ 2.แนวทางการหารูปแบบการตัด (Pattern-Oriented Approach) ซึ่งเป็นแนวทางที่งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นมากกว่าแนวทางแรก โดยเริ่มจากการสร้างรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ (Effective Cutting Pattern) ก่อน จากนั้นจึงคำนวณจำนวนเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ

เพื่อให้ได้ความยาวและจำนวนท่อนครบตามที่ต้องการ [5-7] อย่างไรก็ตามการหาคำตอบของแบบจำลองของปัญหาดังกล่าวเป็นไปได้ยากเนื่องจากจำนวนรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพมีจำนวนมากมาย โดยสามารถคำนวณได้ด้วยทฤษฎีการจัดหมู่ (Combination Theory) ตามสมการที่ (1)

$$C_r^n = \frac{(N+r-1)!}{(N-1)!r!} \quad (1)$$

อาทิเช่น ถ้าความยาวของเหล็กเส้นที่ต้องการ (N) มีจำนวน 20 ความยาว และจำนวนท่อนการตัดต่อรูปแบบ (r) มีจำนวน 5 ท่อน จะมีรูปแบบที่เป็นไปได้มากถึง 42,504 รูปแบบ จึงทำให้งานวิจัยที่ผ่านมาใช้แนวทางแบบฮิวริสติก (Heuristic Approach) ในขั้นตอนการหารูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ อาทิเช่น วิธี Random search algorithm [8] และวิธี Intensive search algorithm [9],[10] จึงอาจไม่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับการคำนวณปัญหาที่มีเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดหลายความยาว

อีกปัญหาหนึ่งของการตัดเหล็กเส้นในงานก่อสร้างคือ

การนำเหล็กเส้นที่ตัดแล้วไปคัดตามรูปทรงและเสริมในตำแหน่งที่ถูกต้องตามแบบ แม้ว่าจะมีรูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่มีประสิทธิภาพ แต่หากเกิดความผิดพลาดในการเสริมเหล็กก็ส่งผลให้เกิดความสูญเสียเหล็กเพิ่มเติมแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมา [11-13] ได้นำเสนอกระบวนการส่งออกข้อมูลจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling : BIM) เพื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่เหลือเศษน้อยที่สุด แต่ไม่ได้นำเสนอแนวทางการเชื่อมโยงข้อมูลของเหล็กที่ตัดแล้วกลับไปยังแบบจำลองสารสนเทศอาคาร จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปวิธีการและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมาได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นจากแบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษน้อยที่สุด โดยพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหารูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นรวมทั้งพัฒนาแนวทางการเชื่อมโยงเชื่อมโยงข้อมูลของเหล็กเส้นที่ตัดแต่ละท่อนกลับไปยังชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

ตารางที่ 1 วิธีการและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

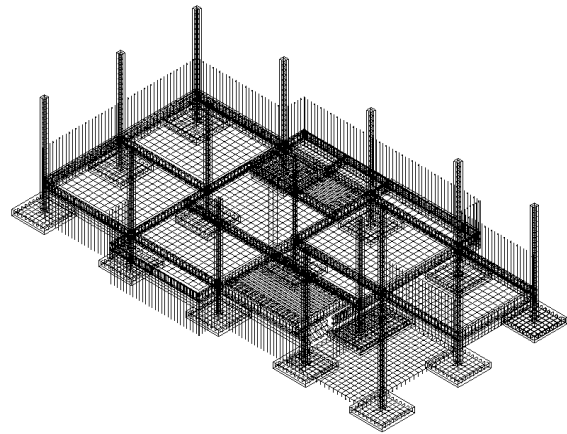
งานวิจัย	วิธีการ	ข้อจำกัด
[3],[4]	ใช้แนวทางการตัดทีละชิ้น (Item-Oriented Approach) ด้วยวิธีฮิวริสติก (Heuristic) เช่น Bin Packing Algorithm, Custom Heuristic Algorithm	- อาจไม่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด - ใช้เวลานานในการคำนวณเนื่องจากต้องคำนวณการตัดทีละชิ้น
[5-10]	ใช้แนวทางการหารูปแบบการตัด (Pattern-Oriented Approach) ด้วยวิธีฮิวริสติก (Heuristic) เช่น Random search algorithm, Intensive search algorithm เพื่อหารูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพและใช้วิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) เพื่อหาจำนวนการตัดซ้ำ	- อาจไม่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด - คำตอบที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งไม่เท่ากันสม่ำเสมอ (Inconsistent) - ไม่ได้พิจารณาการใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐานหลายความยาวมาตัดเพื่อช่วยเพิ่มโอกาสในการหาคำตอบที่เหมาะสมได้มากขึ้น
[11-13]	ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ในการส่งออกข้อมูลเหล็กเส้นมาวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษน้อยที่สุด	ไม่ได้นำเสนอการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นที่ตัดกลับไปยังแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงาน เช่น ตำแหน่งการเสริมเหล็ก และรูปแบบการตัดเหล็ก

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยใช้บ้านพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ชั้น พื้นที่ 210 ตารางเมตร เป็นกรณีศึกษา แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

2.1. กรอบแนวคิดการเชื่อมโยงข้อมูล

ข้อมูลเป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) หากสามารถพัฒนากลไกการเชื่อมโยงข้อมูลองค์ประกอบของอาคารซึ่งประกอบด้วย [14] ข้อมูลกราฟิก (Graphic) ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ เช่น ขนาด ระยะ สี วัสดุ และข้อมูลที่ไม่ใช่กราฟิก (Non-Graphic) เช่น ราคา รุ่น ผู้ผลิต รวมทั้งความสัมพันธ์ด้านพารามิเตอร์เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะให้เป็นอัตโนมัติและลดการทำงานด้วยบุคคล จะส่งผลให้ข้อมูลมีความถูกต้องแม่นยำ รวดเร็ว นำไปสู่การวิเคราะห์และใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมิติ โดยแบบจำลอง BIM ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สร้างจากโปรแกรม Autodesk Revit 2020 เวอร์ชันเพื่อการศึกษา [14] ด้วยระดับการพัฒนา (Level of Development : LOD) ตามขั้นตอนการจัดทำแบบก่อสร้าง (Construction Documents) โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่เดิม เช่น ขนาดและตำแหน่งของโครงสร้างคอนกรีต (Geometry) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก รูปแบบการเสริม (Layout Rule) จำนวน ระยะห่าง ความยาวรวมทั้งหมดของเหล็กเส้น รูปทรงของเหล็กเสริม (Shape) ประเภทของโครงสร้างคอนกรีต (Host_Category) และข้อมูลพารามิเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาใหม่ ได้แก่ รหัสประจำชิ้นส่วนเหล็กเส้น (Rebar_ID) รหัสประจำชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต (Host_ID) รูปแบบการตัดเหล็กเส้น จาก ความยาว 10 เมตร (L10_pattern) และความยาว 12 เมตร (L12_pattern) แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ของโครงสร้างคอนกรีต (Host) กับเหล็กเส้นถูกพัฒนาให้เชื่อมโยงข้อมูลอัตโนมัติด้วยความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (Spatial Relationship) ระหว่างชิ้นส่วนด้วยโปรแกรม Dynamo [15],[16] เป็นซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์ส (Open Source) ซึ่งเป็นแนวทางการเขียนโปรแกรมด้วยภาพ (Visual Programming Language) ที่สามารถเชื่อมต่อข้อมูล



รูปที่ 1 แบบจำลอง BIM เหล็กเส้นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

โดยตรงกับพารามิเตอร์ของทุก ๆ ชิ้นส่วนในอาคาร ทำให้สามารถเพิ่ม ลบ แก้ไข และปรับปรุงค่าของพารามิเตอร์ในฐานข้อมูลในโปรแกรม Autodesk Revit ได้ Dynamo แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1.Input 2.Node และ 3.Output โดยมี wire เชื่อมทั้งสามส่วนเข้าด้วยกัน งานวิจัยนี้ใช้ Node คำสั่งที่สำคัญ คือ Properties.RebarHostElement จาก Structural Design Dynamo Package ในการระบุรหัสประจำชิ้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีตให้กับเหล็กเส้นเพื่อใช้สำหรับการอ้างอิงข้อมูล ขนาดและตำแหน่ง ซึ่งจากเดิมมีการระบุเพียงประเภทของโครงสร้างคอนกรีตที่เหล็กเส้นนั้น ๆ เสริมอยู่เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าเหล็กเส้น เสริมอยู่โครงสร้างใด และตำแหน่งไหนของอาคาร แสดงดังรูปที่ 2

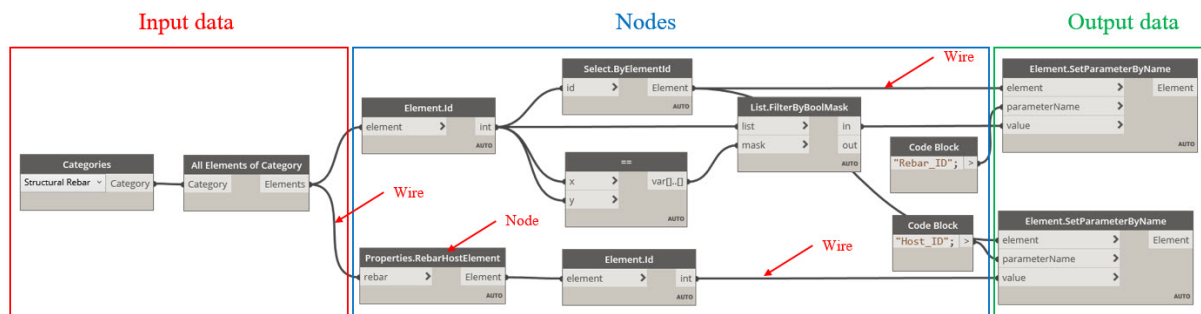
การเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นทั้งการส่งออกข้อมูลจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อใช้ในโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่เหลือน้อยที่สุด และการนำเข้าข้อมูลเหล็กเส้นกลับเข้าสู่แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) อยู่ในรูปแบบโปรแกรมสำนักงาน Microsoft Excel ใช้โปรแกรมเสริม (Plugin) บน Autodesk Revit เป็นเครื่องมือสำคัญในการแปลง เชื่อมโยง และปรับปรุงข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3

2.2. การส่งออกข้อมูลจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

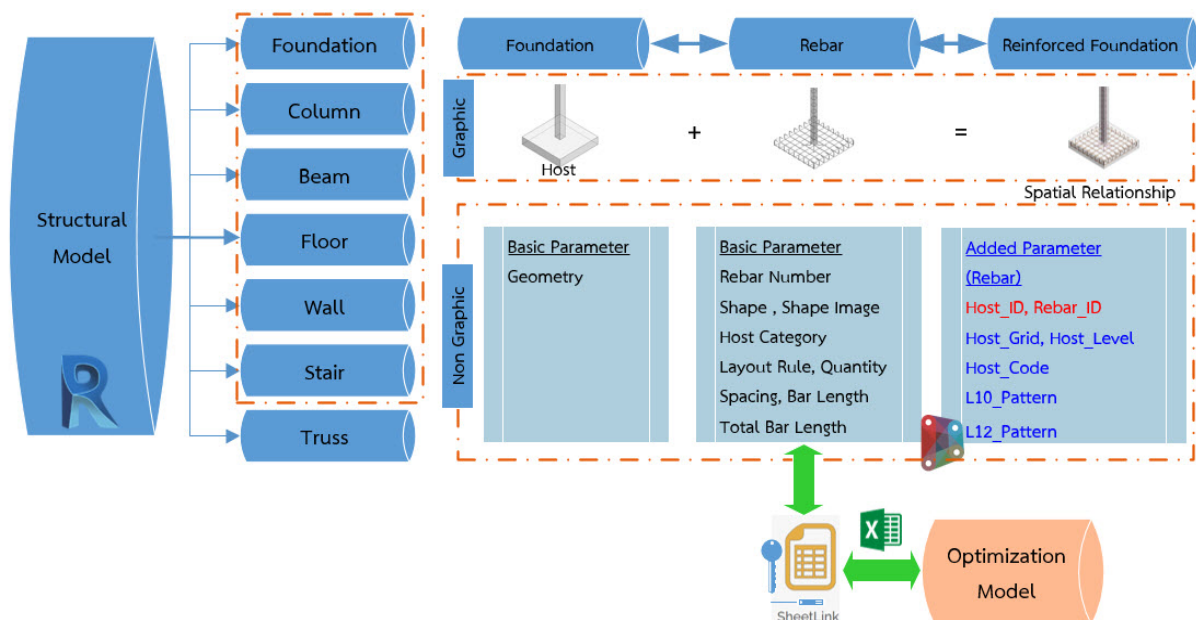
หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว จะมีการจัดการข้อมูลเหล็กเส้นในรูปแบบตาราง

(Schedules) ในโปรแกรม Autodesk Revit แสดงดัง ตารางที่ 2 เพื่อนำไปใช้ในการจำลองโปรแกรมเชิงเส้น โดยใช้โปรแกรมเสริมชื่อ SheetLink พัฒนาโดยทีม DiRoots [17] เป็นโปรแกรมสาธารณะสิทธิ์ (Freeware) สามารถส่งออกข้อมูล เช่นข้อมูลแบบจำลอง คำอธิบายประกอบ (Annotation) ประเภท (Categories) ชิ้นส่วน (Elements) และ ตาราง (Schedules) จากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ไปยังโปรแกรมสำนักงาน Microsoft Excel และนำเข้าข้อมูลกลับมาปรับปรุง (Update) ให้กับแบบจำลองได้อย่างง่ายดายแสดงดังรูปที่ 4 ข้อมูลที่ส่งออกแบ่งเป็น 2 กลุ่มประกอบด้วย 1.ข้อมูลของโครงสร้างคอนกรีต

ได้แก่ ประเภทของโครงสร้างคอนกรีต (Host_Category) รหัสประจำชิ้นส่วน (Host_ID) แนว (Host_Grid) ระดับอ้างอิง (Host_Level) ชื่ออ้างอิง (Host_Code) 2. ข้อมูลเหล็กเส้นได้แก่ รหัสประจำชิ้นส่วนเหล็กเส้น เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) รูปทรงของเหล็กเสริม (Shape) ความยาว (Bar_Length) จำนวน (Quantity) ความยาวทั้งหมด (Total Bar_Length) จำนวน กลุ่ม ความยาว (Rebar_Number) รูปแบบการตัดเหล็กเส้นจากเหล็กความยาว 10 เมตร (L10_Pattern) และ 12 เมตร (L12_Pattern) เพื่อบันทึกผลการคำนวณรูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่เหมาะสมที่สุด



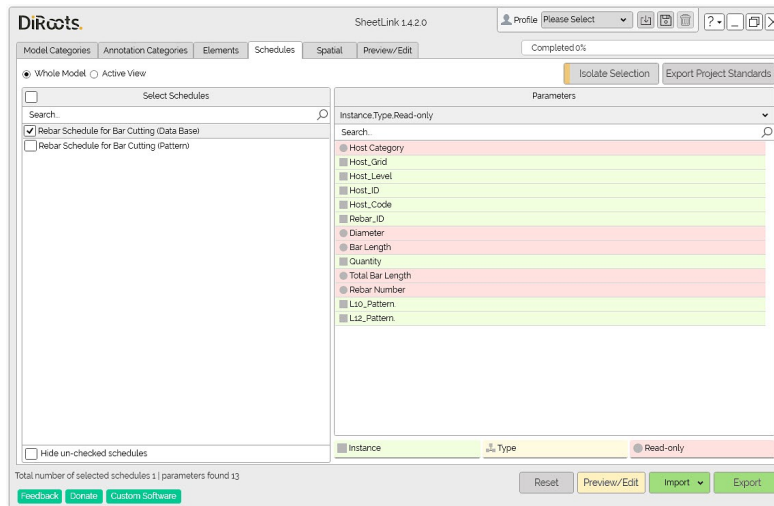
รูปที่ 2 Dynamo Script สำหรับระบุ Host_ID ของเหล็กเส้น



รูปที่ 3 กรอบแนวคิดการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้น

ตารางที่ 2 ตารางข้อมูลเหล็กเส้นในโปรแกรม Autodesk Revit

Rebar Schedule for Bar Cutting (Data Base)														
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Host Category	Host Grid	Host Level	Host ID	Host Code	Rebar ID	Diameter	Shape	Shape Image	Bar Length (m.)	Quantity	Total Bar Length	Rebar Number	L10 Pattern	L12 Pattern
Structural Foundation	1/A	EL.+0.00	546407	F1	684657	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	1/A	EL.+0.00	546407	F1	684839	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	1/B	EL.+0.00	547219	F1	684946	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	1/B	EL.+0.00	547219	F1	684985	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	2/A	EL.+0.00	546536	F1	685083	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	2/A	EL.+0.00	546536	F1	685085	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	3/A	EL.+0.00	546663	F1	685098	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	3/A	EL.+0.00	546663	F1	685099	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	4/A	EL.+0.00	546760	F1	685111	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	4/A	EL.+0.00	546760	F1	685112	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	5/A	EL.+0.00	546845	F1	685124	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	9	17.05	1		
Structural Foundation	5/A	EL.+0.00	546845	F1	685125	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.80	9	16.17	8		
Structural Foundation	4/B	EL.+0.00	547995	F2	685537	DB12	S6	M_S6-2.jpg	1.89	18	34.09	1		
Structural Foundation	4/B	EL.+0.00	547995	F2	685777	DB12	S6	M_S6-2.jpg	2.89	9	26.00	16		



รูปที่ 4 โปรแกรมเสริม SheetLink เพื่อนำเข้าและส่งออกข้อมูล

2.3. การพัฒนาแบบจำลองการตัดเหล็กเส้น

ผู้วิจัยดำเนินการได้พัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming Model) สำหรับการหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยมีการคำนวณ 2 ขั้นตอนประกอบด้วย 1. การหารูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Cutting Patterns) และ 2. การหา รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Cutting Patterns) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Cutting Patterns)

เนื่องจากแนวทางการหารูปแบบการตัด (Pattern-Oriented Approach) จำเป็นต้องเริ่มจากการสร้างรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้จำนวนหนึ่งสำหรับนำไปใช้ในขั้นตอนการตัดซ้ำ เพื่อให้ได้จำนวนเหล็กเส้นครบตามประเภทและจำนวนท่อนที่ต้องการ ซึ่งรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้นั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก หากนำรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดไปใช้คำนวณในขั้นตอนการตัดซ้ำด้วยแนวทางการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Approach) จะทำให้มีจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่ต้องหาคำตอบเป็นจำนวนมากอันส่งผลให้ต้องใช้เวลานานในการหาคำตอบ (Large Computational Time) และบางครั้งอาจไม่เจอคำตอบเนื่องจากความซับซ้อนในการหาคำตอบที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ หรือติดอยู่ในการระเบิดแบบผสมผสาน (Trapped in Combinatorial Explosion)

ดังนั้นในขั้นตอนที่ 1 ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับคัดเลือกรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพจากรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมด ตามสมการที่ (2) ถึง (12) โดยการหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานมากกว่าหนึ่งขนาด อาทิเช่น 10 เมตร 12 เมตร และ/หรือ 15 เมตร เป็นต้น เนื่องจากการตัดเหล็กเส้นจำเป็นต้องตัดให้ได้จำนวนท่อนครบตามความยาวที่ต้องการ ดังนั้นความหลากหลายของรูปแบบการตัดที่เพิ่มขึ้นจากการใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐานมากกว่าหนึ่งขนาดจะช่วยเพิ่มโอกาสในการหาคำตอบที่เหมาะสมได้มากขึ้น โดยในแต่ละรูปแบบการตัดจะมีตัวแปรตัดสินใจคือจำนวนท่อนที่ตัดตามความยาวขนาดต่าง ๆ ที่ต้องการด้วยเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานจำนวนหนึ่งเส้นตามสมการที่ (2) โดยรูปแบบการตัดที่ถูกคัดเลือกมาเป็นชุดของรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีผลรวมของความยาวเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดและความยาวเศษเหล็กที่ตัดเกินกว่าจำนวนที่ต้องการน้อยที่สุดตามฟังก์ชันเป้าหมายในสมการที่ (3) นอกจากนี้รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพแต่ละรูปแบบจะต้องเหลือความยาวของเศษจากการตัดไม่เกินความยาวที่สั้นที่สุดของเหล็กเส้นที่ต้องการตามสมการที่ (4) และเนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอาจเกิดขึ้นในกรณีที่ต้องใช้รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพทุกรูปแบบเพื่อตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานรูปแบบละหนึ่งเส้นในขั้นตอนที่ 2 ดังนั้นในขั้นตอนการคัดเลือกรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพนี้จึง

กำหนดให้แต่ละรูปแบบการตัดใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐานเพียงหนึ่งเส้น ทั้งนี้เพื่อลดจำนวนตัวแปรตัดสินใจให้น้อยที่สุดและมั่นใจว่าจะได้จำนวนรูปแบบการตัดขั้นต่ำที่เพียงพอสำหรับการตัดเหล็กเส้นครบตามจำนวนที่ต้องการจึงกำหนดจำนวนของรูปแบบการตัดเท่ากับจำนวนเส้นของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่ต้องใช้ในการตัดให้ครบตามความยาวรวมที่ต้องการ โดยเพื่อความยาวในกรณีที่เหลือทุกเส้นเหลือเศษจากการตัดเท่ากับความยาวที่สั้นที่สุดของเหล็กเส้นที่ต้องการตาม สมการที่ (5) โดยการตัดผลรวมของจำนวนท่อนที่ตัดได้ต้องไม่น้อยกว่าจำนวนท่อนที่ต้องการตามสมการที่ (6) ซึ่งแต่ละรูปแบบต้องตัดไม่เกินความยาวของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานตามสมการที่ (7) ทำให้เหลือเศษเหล็กจากการตัดตามสมการที่ (8) ซึ่งจะต้องยาวน้อยกว่าความยาวเศษเหล็กที่ยอมให้มากที่สุดตามสมการที่ (9) ความยาวเศษเหล็กที่ตัดเกินกว่าจำนวนที่ต้องการสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (10) โดยกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็มและไม่น้อยกว่าศูนย์ตามสมการที่ (11) และ (12)

2. รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Cutting Patterns)

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการนำรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพสำหรับเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานทุกขนาดจากขั้นตอนที่ 1 มาคัดเลือกเป็นรูปแบบการตัด ที่เหมาะสมที่สุดอีกครั้ง โดยกำหนดให้จำนวนท่อนของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดซ้ำด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพแต่ละรูปแบบเป็นตัวแปรตัดสินใจตามสมการที่ (13) กล่าวคือรูปแบบที่ตัวแปรตัดสินใจเท่ากับศูนย์แสดงว่าไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการตัด ดังนั้นรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดคือรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพที่ถูกคัดเลือกมาใช้ในการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน (10 เมตร และ/หรือ 12 เมตร) เพื่อให้ได้เหล็กเส้นครบตามความยาวและจำนวนท่อนที่ต้องการ โดยเหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด (Optimal Solution) กล่าวคือมีผลรวมของความยาวเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดและความยาวเศษเหล็กที่ตัดเกินกว่าจำนวนที่ต้องการน้อยที่สุดตามฟังก์ชันเป้าหมายในสมการที่ (14) และมีสมการข้อจำกัดที่ (15) ถึง (20) เหมือนในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์เศษเหล็กที่น้อยที่สุดได้ตามสมการที่ (21)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ขั้นตอนที่ 1

$$\{a_{(i,j)} \mid i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\} \quad (2)$$

ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ขั้นตอนที่ 1

$$\text{Minimize } T_{(s)} = \sum_{j=1}^m T_{(s,j)} + \sum_{i=1}^n T_{(s,i)} \quad (3)$$

ข้อจำกัด (Constraints) ขั้นตอนที่ 1

$$T_{\max} \leq \min_{\omega \rightarrow 0} \{L_{(i)} - \omega \mid i=1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

$$m = \text{Round up} \left(\sum_{i=1}^n \frac{L_{(i)} D_{(i)}}{L_{(s)}} \left(1 + \frac{T_{\max}}{L_{(s)}} \right) \right) \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{(i,j)} \geq D_{(i)} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n (L_{(i)} a_{(i,j)}) \leq L_{(s)} \quad (7)$$

$$T_{(s,j)} = L_{(s)} - \sum_{i=1}^n (L_{(i)} a_{(i,j)}) \quad (8)$$

$$T_{(s,j)} < T_{\max} \quad (9)$$

$$T_{(s,i)} = L_{(i)} \left(\sum_{j=1}^m a_{(i,j)} - D_{(i)} \right) \quad (10)$$

$$a_{(i,j)} = \text{Integer} \quad (11)$$

$$a_{(i,j)} \geq 0 \quad (12)$$

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ขั้นตอนที่ 2

$$P_{(s,j)} \quad (13)$$

ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ขั้นตอนที่ 2

$$\text{Minimize } T' = \sum_{s=1}^k \sum_{j=1}^m T'_{(s,j)} + \sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^n T'_{(s,i)} \quad (14)$$

ข้อจำกัด (Constraints) ขั้นตอนที่ 2

$$\sum_{s=1}^k \sum_{j=1}^m a_{(i,j)} P_{(s,j)} \geq D_{(i)} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n (L_{(i)} a_{(i,j)}) \leq L_{(s,j)} \quad (16)$$

$$T'_{(s,j)} = P_{(s,j)} (L_{(s,j)} - \sum_{i=1}^n L_{(i)} a_{(i,j)}) \quad (17)$$

$$T'_{(s,i)} = L_{(i)} \left(\sum_{j=1}^m a_{(i,j)} P_{(s,j)} - D_{(i)} \right) \quad (18)$$

$$P_{(s,j)} \geq 0 \quad (19)$$

$$P_{(s,j)} = \text{Integer} \quad (20)$$

$$W_{(i)} = \left(\frac{T}{\sum_{i=1}^n L_{(i)} D_{(i)}} \right) \quad (21)$$

เมื่อ

$a_{(i,j)}$ = จำนวนท่อนของการตัดเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i ด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพลำดับที่ j

n = จำนวนความยาวของเหล็กเส้นที่ต้องการ

m = จำนวนรูปแบบการตัด

T_s = จำนวนเศษเหล็กทั้งหมดที่เหลือจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s

$T_{(s,j)}$ = ความยาวเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s ด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพลำดับที่ j

$T_{(s,i)}$ = ความยาวเศษเหล็กจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s เกินกว่าจำนวนท่อนของเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i ด้วยรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ

$T_{\max}$ = ความยาวเศษเหล็กมากสุดในแต่ละรูปแบบการตัด

$L_{(i)}$ = ความยาวของเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i

ω = ค่าคงที่เข้าใกล้ศูนย์

$D_{(i)}$ = จำนวนท่อนของเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i

$L_{(s)}$ = ความยาวของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s

$P_{(s,j)}$ = จำนวนของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s ซึ่งใช้รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดลำดับที่ j

T = ความยาวเศษเหล็กทั้งหมดที่เหลือน้อยที่สุดจากการตัดเหล็กเส้นด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุด

$T'_{(s,j)}$ = ความยาวเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s ด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดลำดับที่ j

$T'_{(s,i)}$ = ความยาวเศษเหล็กจากการตัดเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s เกินกว่าจำนวนท่อนของเหล็กเส้นที่ต้องการลำดับที่ i ด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุด

k = จำนวนความยาวของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน

$L_{(s,j)}$ = ความยาวของเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานลำดับที่ s ซึ่งใช้รูปแบบการตัดลำดับที่ j

$W_{(i)} =$ เปอร์เซนต์เศษเหล็กที่น้อยที่สุด

2.4.การนำข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้วิศวกรและช่างเหล็กสามารถทราบได้ว่าเหล็กเส้นที่ตัดด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดแต่ละท่อนต้องตัดด้วยรูปทรง (Shape) แบบใด และต้องเสริมที่ตำแหน่งใดของโครงสร้างอาคาร ทำให้สามารถคระยะเวลาและความผิดพลาดในการทำงานลงได้

หลังจากได้ผลลัพธ์จากการหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่เหลือเศษน้อยที่สุด จากหัวข้อที่ 2.3 แล้วข้อมูลจะถูกบันทึกในคอลัมน์ L10_Pattern และ L12_Pattern ในโปรแกรมสำนักงาน Microsoft Excel (ตารางจากหัวข้อ 2.2) หลังจากนั้นใช้ โปรแกรมเสริม SheetLink ในการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นกลับไปยังแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ในตารางเพื่อปรับปรุงข้อมูล (Update) ในส่วนของคอลัมน์ L10_Pattern และ L12_Pattern โดยข้อมูลกำหนดให้มีชุดรหัสเลขสามกลุ่ม (รูปแบบหลัก-รูปแบบย่อยเรียงตามความยาว-จำนวนท่อน) สำหรับรหัสประจำชิ้นส่วนของเหล็กเส้น (Element_ID) เป็นรหัสตัวเลข 6 หลัก ซึ่งมีลักษณะไม่ซ้ำกันเป็นคีย์หลัก (Primary Key : PK) ถูกใช้ในการเชื่อมโยงข้อมูล โดยความสัมพันธ์ของโครงสร้างคอนกรีตสามารถมีเหล็กเส้นเสริมได้มากกว่า 1 เส้นหรือกลุ่ม (ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อกลุ่ม) แต่ในทางกลับกัน เหล็กเส้น 1 เส้นหรือกลุ่ม สามารถเสริมในโครงสร้างคอนกรีตได้ชิ้นเดียวเท่านั้น โดยการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโครงสร้าง เหล็กเส้น และรูปแบบการตัดเหล็กเส้นแสดงดังรูปที่ 5

3. ผลการศึกษา

จากวิธีการศึกษาข้างต้น ผู้วิจัยได้ผลการศึกษาโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน มีรายละเอียดดังนี้

3.1.ข้อมูลส่งออกจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

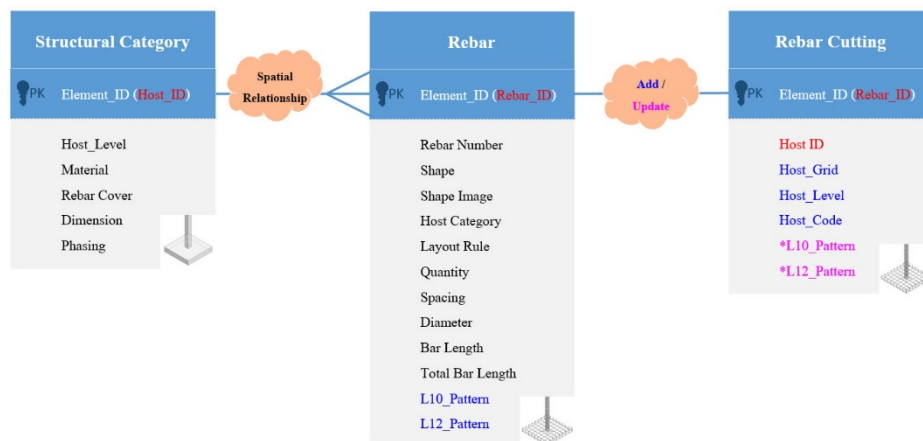
ผลการดำเนินการจากหัวข้อ 2.2 ได้ตารางฐานข้อมูลเหล็กเส้นใน โปรแกรมสำนักงาน Microsoft Excel สอดคล้องกับตารางที่ 2 ซึ่งแสดงชื่อ ประเภทข้อมูลและกลุ่มพารามิเตอร์ ทั้งนี้ รหัสประจำชิ้นส่วน (Element_ID) โปรแกรมเสริม SheetLink สร้างให้อัตโนมัติ เพื่อใช้ในการเชื่อมโยงข้อมูล แสดงดังตารางที่ 3

3.2.ประสิทธิภาพของแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น

ผู้วิจัยใช้กรณีศึกษาของการตัดเหล็กเส้นจำนวน 3 กรณีของงานวิจัยที่ผ่านมา [9],[10] ที่มีรายละเอียดความยาวและจำนวนท่อนของเหล็กเส้นที่ต้องการตัดดังแสดงในตารางที่ 4 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นที่ได้พัฒนาขึ้นกับผลการคำนวณด้วยวิธีของงานวิจัยที่ผ่านมา [10], [11] โดยใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน 10 เมตร และ 12 เมตร จะได้ผลการวิเคราะห์รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 ด้วยวิธีการที่นำเสนอในตารางที่ 5–7 ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 1 (ตารางที่ 5) มีเศษเหล็กที่

เหลือจากการตัดทั้งหมด 4.86 เมตร และเศษเหล็กที่ตัดเกินทั้งหมด 8.41 เมตร ส่งผลให้มีเศษเหล็กทั้งหมด 13.27 เมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก 1.44% (จากความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด 918.73 เมตร) โจทย์ตัวอย่างที่ 2 (ตารางที่ 6) มีเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดทั้งหมด 5.53 เมตร และเศษเหล็กที่ตัดเกินทั้งหมด 1.44 เมตร ส่งผลให้มีเศษเหล็กทั้งหมด 6.97 เมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก 0.68% (จากความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด 1,027.03 เมตร) และ โจทย์ตัวอย่างที่ 3 (ตารางที่ 7) มีเศษเหล็กที่เหลือจากการตัดทั้งหมด 3.37 เมตร และเศษเหล็กที่ตัดเกินทั้งหมด 0.87 เมตรส่งผลให้มีเศษเหล็กทั้งหมด 4.24 เมตรคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก 0.44% (จากความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด 963.76 เมตร)



รูปที่ 4 การเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลโครงสร้าง เหล็กเส้น และรูปแบบการตัดเหล็กเส้น

ตารางที่ 3 ข้อมูลเหล็กเส้นจากโปรแกรม Autodesk Revit

Element ID	Host Category	Host Grid	Host Level	Host ID	Host Code	Rebar ID	Dia.	Bar Length (m.)	Quantity	Total Bar Length	Rebar No.	L10 Pattern	L12 Pattern
684657	Foundation	1/A	EL.+0.00	546407	F1	684657	DB12	1.89	9	17.05	1		
684839	Foundation	1/A	EL.+0.00	546407	F1	684839	DB12	1.80	9	16.17	8		
684946	Foundation	1/B	EL.+0.00	547219	F1	684946	DB12	1.89	9	17.05	1		
684985	Foundation	1/B	EL.+0.00	547219	F1	684985	DB12	1.80	9	16.17	8		
685083	Foundation	2/A	EL.+0.00	546536	F1	685083	DB12	1.89	9	17.05	1		
685085	Foundation	2/A	EL.+0.00	546536	F1	685085	DB12	1.80	9	16.17	8		
685098	Foundation	3/A	EL.+0.00	546663	F1	685098	DB12	1.89	9	17.05	1		
685099	Foundation	3/A	EL.+0.00	546663	F1	685099	DB12	1.80	9	16.17	8		
685111	Foundation	4/A	EL.+0.00	546760	F1	685111	DB12	1.89	9	17.05	1		
685112	Foundation	4/A	EL.+0.00	546760	F1	685112	DB12	1.80	9	16.17	8		
685537	Foundation	4/B	EL.+0.00	547995	F2	685537	DB12	1.89	18	34.09	1		
685777	Foundation	4/B	EL.+0.00	547995	F2	685777	DB12	2.89	9	26.00	16		

ตารางที่ 4 โจทย์ตัวอย่าง

ลำดับ ที่	โจทย์ตัวอย่างที่					
	1		2		3	
	ความ ยาว (ม.)	จำนวน ท่อน	ความ ยาว (ม.)	จำนวน ท่อน	ความ ยาว (ม.)	จำนวน ท่อน
1	0.95	25	0.48	56	0.45	31
2	1.40	18	0.82	65	0.55	90
3	1.75	14	0.99	39	0.87	39
4	1.80	23	1.12	4	1.22	18
5	1.88	7	1.20	8	1.28	3
6	2.67	22	1.64	28	1.58	19
7	2.88	10	2.34	11	2.39	12
8	3.05	36	2.54	10	2.41	10
9	3.20	4	3.15	19	2.75	18
10	3.75	15	3.38	13	3.68	9
11	5.00	26	3.78	14	3.92	18
12	5.40	19	3.85	13	3.99	13
13	6.35	7	5.15	10	5.09	11
14	7.00	23	5.63	16	5.48	15
15	7.19	12	6.96	14	6.80	14
16			7.40	4	7.49	14
17			8.43	17	8.22	25
18			9.39	19	8.98	1

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 1

รูป แบบ ที่	เหล็กเส้นความ ยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษ เหล็ก (ม.)
	ความ ยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
1	10	1	3-3.20	0.40
2	10	1	2-5.00	0.00
3	10	1	1-0.95, 2-1.80, 1-5.40	0.05
4	10	1	1-1.40, 2-80, 1-5.00	0.00
5	10	4	1-0.95, 1-2.67, 1-6.35	0.12
6	12	3	3-1.88, 1-6.35	0.03
7	12	10	1-0.95, 1-2.67, 1-2.88, 1-5.40	1.00
8	12	5	1-0.95, 4-1.8, 1-3.75	0.50
9	12	1	6-0.95, 2-3.05	0.20
10	12	8	2-1.40, 3-3.05	0.40
11	12	9	1-1.75, 1-3.05, 1-7.19	0.09
12	12	1	5-1.75, 1-3.05	0.20
13	12	8	1-2.67, 1-3.75, 1-5.40	1.44
14	12	23	1-5.00, 1-7.00	0.00
15	12	1	1-1.40, 1-3.20, 1-7.19	0.21
16	12	2	1-0.95, 1-3.75, 1-7.19	0.22
เศษเหล็กตัดเหลือทั้งหมด (ม.)				4.86
เศษเหล็กตัดเกินทั้งหมด (ม.)				8.41
เศษเหล็กทั้งหมด (ม.)				13.27
ความยาวที่ต้องการรวม (ม.)				918.7
เปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก (%)				1.44

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 2

รูป แบบ ที่	เหล็กเส้นความ ยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษ เหล็ก (ม.)
	ความ ยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
1	10	4	1-1.20, 1-3.15, 1-.63	0.08
2	10	1	1-0.99, 1-3.38, 1-5.63	0.00
3	10	1	1-2.54, 1-7.40	0.06
4	10	2	1-0.99, 1-3.85, 1-5.15	0.02
5	10	1	8-0.82, 1-3.38	0.06
6	10	2	1-0.48, 1-0.82, 1-1.20, 1-7.40	0.20
7	12	1	3-0.82, 1-9.39	0.15
8	12	1	1-1.12, 1-3.15, 1-7.40	0.33
9	12	1	1-0.48, 1-0.82, 1-1.12, 1-9.39	0.19
10	12	1	1-0.99, 3-1.64, 1-2.54, 1-3.38	0.17
11	12	5	1-0.48, 1-3.78, 2-3.85	0.20
12	12	2	6-0.82, 1-6.96	0.24
13	12	10	2-0.82, 1-3.38, 1-6.96	0.20
14	12	8	1-0.82, 1-0.99, 1-1.64, 1-8.43	0.96
15	12	1	1-1.12, 1-3.85, 1-6.96	0.07
16	12	9	1-0.48, 3-0.99, 1-8.43	1.08
17	12	1	1-1.12, 1-3.78, 1-6.96	0.14
18	12	1	2-1.20, 3-3.15	0.15
19	12	17	2-0.48, 1-1.64, 1-9.39	0.17
20	12	8	1-0.48, 1-2.54, 1-3.78, 1-5.15	0.40
21	12	11	1-0.82, 1-2.34, 1-3.15, 1-5.63	0.66
เศษเหล็กตัดเหลือทั้งหมด (ม.)				5.53
เศษเหล็กตัดเกินทั้งหมด (ม.)				1.44
เศษเหล็กทั้งหมด (ม.)				6.97
ความยาวที่ต้องการรวม (ม.)				1,027
เปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก (%)				0.68

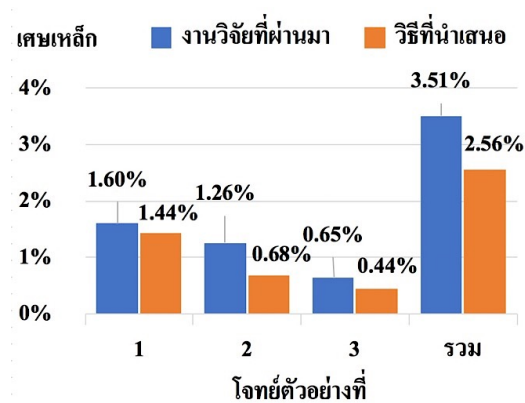
ตารางที่ 7 ผลการคำนวณสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 3

รูป แบบ ที่	เหล็กเส้นความ ยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษ เหล็ก (ม.)
	ความ ยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
1	10	1	1-0.87, 1-3.99, 1-5.09	0.05
2	10	5	1-2.39, 1-3.68, 1-3.92	0.05
3	10	12	1-0.45, 1-2.75, 1-6.80	0.00
4	10	4	1-1.22, 1-3.68, 1-5.09	0.04
5	10	5	3-0.55, 1-0.87, 1-2.39, 1-5.09	0.00

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณสำหรับโจทย์ตัวอย่างที่ 3 (ต่อ)

รูปแบบ	เหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษเหล็ก (ม.)
	ความยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
6	10	5	1-0.45, 3-0.55, 2-3.92	0.30
7	12	4	1-0.87, 2-5.48	0.68
8	12	2	1-1.22, 1-3.92, 1-6.80	0.12
9	12	1	1-0.55, 1-2.39, 1-8.98	0.08
10	12	5	2-1.22, 1-3.99, 1-5.48	0.45
11	12	7	1-0.45, 1-3.99, 1-7.49	0.49
12	12	2	1-0.55, 2-1.58, 1-8.22	0.14
13	12	6	1-0.45, 1-0.87, 1-2.41, 1-8.22	0.30
14	12	2	6-0.87, 1-1.22, 1-5.48	0.16
15	12	6	2-0.87, 1-2.75, 1-7.49	0.12
16	12	1	1-0.45, 1-1.58, 1-2.41, 1-7.49	0.07
17	12	1	1-0.55, 1-2.39, 1-3.92, 1-5.09	0.05
18	12	3	1-1.28, 1-2.41, 1-8.22	0.27
19	12	14	4-0.55, 1-1.58, 1-8.22	0.00
เศษเหล็กตัดเหลือทั้งหมด (ม.)				3.37
เศษเหล็กตัดเกินทั้งหมด (ม.)				0.87
เศษเหล็กทั้งหมด (ม.)				4.24
ความยาวที่ต้องการรวม (ม.)				963.8
เปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก (%)				0.44

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เศษเหล็กกับวิธีของงานวิจัยที่ผ่านมา [9], [10] ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าโจทย์ตัวอย่างที่ 1-3 วิธีที่นำเสนอสามารถลดปริมาณเศษได้เพิ่มขึ้นถึง 10%, 46.16% และ 32.31% ตามลำดับ (งานวิจัยที่ผ่านมา [10], [11] มีเศษเหล็กเหลือ 1.6%, 1.26% และ 0.62% ตามลำดับ) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถลดจำนวนเศษเหล็กได้มากขึ้นดังโจทย์ตัวอย่างที่ 1 27.13% ซึ่งเป็นปริมาณเศษเหล็กที่ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ตัวอย่างข้อมูลเหล็กเส้นข้ออ้อยขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรที่ได้จากการลดปริมาณจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) สรุปในตารางที่ 8 ถูกนำมาวิเคราะห์รูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดตามสมการที่ (2)-(21) แสดงในตารางที่ 9 โดยมีปริมาณเศษเหล็กเพียง 37.4 เมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก 2.46% (จากความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด 1,520.60 เมตร)

3.3. ข้อมูลนำเข้าสู่แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

จากผลการดำเนินการหั่วข้อที่ 2.4 และ 3.2 จะได้ผลลัพธ์ของข้อมูลการตัดเหล็กเส้นในรูปแบบต่าง ๆ ความยาวของแต่ละท่อน และจำนวนท่อน จากเหล็กความยาว 10 เมตร และหรือ 12 เมตร อาทิเช่น รหัส L10_Pattern เท่ากับ 011-03-004 หมายถึงรูปแบบหลักการตัดที่ 11 (011) รูปแบบย่อยความยาวลำดับที่ 3 (2.89 ม.) จำนวน 4 ท่อน(004) โดยข้อมูลดังกล่าวจะถูกเชื่อมโยงกับตารางข้อมูลเหล็กเส้น (Schedules) แสดงดังตารางที่ 10 และเชื่อมโยงข้อมูลรูปแบบการตัดเหล็กเส้นเพิ่มเติม (L10_Pattern และ L12_Pattern) ในพารามิเตอร์ของชิ้นส่วน โครงสร้างคอนกรีตในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) แสดงดังรูปที่ 7 นอกจากนี้ยังสามารถจัดพิมพ์ตารางข้อมูลการตัดเหล็กเส้น รูปทรงการตัดเหล็กเส้น และตำแหน่งการเสริมเหล็กเส้นเพื่อใช้ในการทำงานแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 4 ข้อมูลเหล็กเส้น DB12 จาก BIM

ลำดับที่	ความยาว (ม.)	จำนวนท่อน	ลำดับที่	ความยาว (ม.)	จำนวนท่อน
1	0.64	1	29	2.80	13
2	0.73	9	30	2.89	9
3	0.93	2	31	3.56	2
4	1.00	2	32	3.58	5
5	1.01	12	33	3.63	2
6	1.02	2	34	3.80	17
7	1.03	12	35	4.12	5
8	1.06	3	36	4.13	3
9	1.12	6	37	4.22	3
10	1.13	16	38	4.24	4
11	1.19	21	39	4.25	6
12	1.20	6	40	4.29	11
13	1.41	6	41	4.30	10
14	1.68	2	42	4.33	3
15	1.80	126	43	4.65	4
16	1.85	4	44	7.07	3
17	1.89	146	45	7.17	3
18	1.90	2	46	7.21	6
19	1.97	2	47	7.49	3
20	2.10	20	48	7.60	3
21	2.21	21	49	7.72	9
22	2.37	22	50	7.74	3
23	2.38	23	51	8.06	3
24	2.40	24	52	8.09	6
25	2.50	25	53	8.11	2
26	2.59	26	54	8.26	3
27	2.72	27	55	8.28	9
28	2.73	28	56	8.29	6

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์ของรูปแบบการตัดเหล็กเส้น DB12

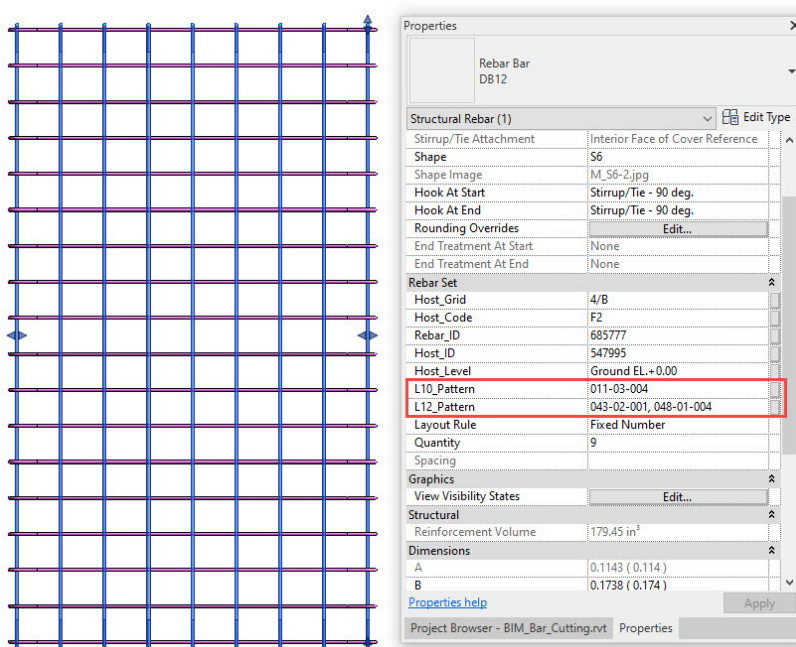
รูปแบบที่	เหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษเหล็ก (ม.)
	ความยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
1	10	5	2-1.19, 2-3.80	0.10
2	10	3	2-1.13, 1-7.74	0.00
3	10	1	1-1.68, 1-8.28	0.04
4	10	4	1-2.72, 1-7.21	0.28
5	10	2	1-1.00, 1-1.03, 2-1.89, 1-4.12	0.14
6	10	1	2-1.80, 1-2.10, 1-4.25	0.05
7	10	1	1-1.03, 1-4.25, 1-4.65	0.07
8	10	2	1-1.01, 1-1.41, 1-1.80, 1-2.21, 1-3.56	0.02
9	10	2	1-1.89, 1-8.11	0.00
10	10	1	1-1.68, 1-2.10, 1-2.40, 1-3.80	0.02

ตารางที่ 9 ผลลัพธ์รูปแบบการตัดเหล็กเส้น DB12 (ต่อ)

รูปแบบที่	เหล็กเส้นความยาวมาตรฐาน		รูปแบบการตัด [จำนวนท่อน-ความยาว (ม.)]	เศษเหล็ก (ม.)
	ความยาว (ม.)	จำนวน (เส้น)		
11	10	4	1-1.01, 1-1.80, 1-2.89, 1-4.25	0.20
12	10	2	1-1.90, 1-8.09	0.02
13	10	1	1-0.73, 1-1.80, 4-1.85	0.07
14	10	2	2-2.80, 1-4.22	0.36
15	12	1	2-2.10, 1-2.40, 2-2.50	0.40
16	12	2	1-1.03, 1-1.19, 1-1.89, 1-3.58, 1-4.30	0.02
17	12	3	1-3.80, 1-8.06	0.42
18	12	1	2-1.03, 1-1.89, 2-3.80	0.45
19	12	2	3-1.41, 1-7.72	0.10
20	12	1	2-1.80, 1-8.26	0.14
21	12	2	1-1.80, 1-2.80, 1-7.21	0.38
22	12	4	1-1.03, 5-1.80, 1-1.89	0.32
23	12	1	1-1.20, 6-1.80	0.00
24	12	2	1-0.93, 1-2.80, 2-4.13	0.02
25	12	9	1-1.19, 6-1.80	0.09
26	12	6	1-1.13, 2-1.89, 1-2.80, 1-4.29	0.00
27	12	1	1-0.64, 1-1.03, 1-1.20, 2-2.38, 1-4.29	0.08
28	12	9	1-0.73, 1-1.80, 5-1.89	0.18
29	12	3	1-4.65, 1-7.17	0.54
30	12	4	4-1.89, 1-4.29	0.60
31	12	7	4-1.89, 1-4.30	0.98
32	12	2	1-1.02, 1-2.37, 1-8.26	0.70
33	12	3	1-1.06, 2-1.89, 1-7.07	0.27
34	12	1	4-1.20, 2-2.10, 1-2.73	0.27
35	12	1	3-1.13, 1-4.22, 1-4.30	0.09
36	12	3	2-1.01, 1-1.89, 1-7.60	1.47
37	12	1	4-1.89, 2-1.97	0.50
38	12	6	1-1.80, 1-1.89, 1-8.29	0.12
39	12	3	2-1.12, 1-1.89, 1-7.72	0.45
40	12	3	1-4.33, 1-7.49	0.54
41	12	1	1-1.13, 1-1.80, 2-1.89, 2-2.59	0.11
42	12	1	1-1.01, 1-1.89, 2-2.72, 1-3.63	0.03
43	12	1	1-1.80, 1-2.89, 2-3.63	0.05
44	12	1	2-2.10, 1-3.58, 1-3.80	0.42
45	12	2	1-3.58, 2-4.12	0.36
46	12	8	2-1.80, 1-8.28	0.96
47	12	2	2-1.89, 1-8.09	0.26
48	12	1	4-2.89	0.44
49	12	4	1-4.24, 1-7.72	0.16
50	12	2	2-1.89, 1-8.09	0.26
เศษเหล็กตัดเหลือทั้งหมด (ม.)				13.55
เศษเหล็กตัดเกินทั้งหมด (ม.)				23.85
เศษเหล็กทั้งหมด (ม.)				37.40
ความยาวที่ต้องการรวม (ม.)				1,521
เปอร์เซ็นต์เศษเหล็ก (%)				2.46%

ตารางที่ 6 การเชื่อมโยงข้อมูลการตัดเหล็กเส้นในพารามิเตอร์ของชิ้นส่วนของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

Element ID	Host Grid	Host ID	Host Code	Rebar ID	Dia.	Bar Length (m.)	Qty.	Total Bar Length (m.)	Rebar No.	L10 Pattern	L12 Pattern
684657	1/A	546407	F1	684657	DB12	1.89	9	17.05	1	005-03-004, 009-01-002	016-03-002, 018-02-001
684839	1/A	546407	F1	684839	DB12	1.80	9	16.17	8		022-03-004, 026-02-005
685537	4/B	547995	F2	685537	DB12	1.89	18	34.09	1		037-01-001, 038-02-006, 039-02-003, 041-03-002, 042-02-001, 047-01-004, 050-01-001
685777	4/B	547995	F2	685777	DB12	2.89	9	26.00	16	011-03-004	043-02-001, 048-01-004



รูปที่ 6 การเชื่อมโยงข้อมูลรูปแบบการตัดเหล็กเส้นชุดข้อมูลเหล็กเส้นในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการนำข้อมูลเหล็กเส้นจากชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการตัดเหล็กเส้นให้เหลือเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยได้พัฒนาวิธีการคัดเลือกรูปแบบการตัดเหล็กให้เหลือเศษน้อยที่สุดด้วยแนวทางการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Approach) จึงทำให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นมากกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [3-10] ซึ่งใช้แนวทาง แบบฮิวริสติก (Heuristic Approach) หรือเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic Approach)

ทำให้คำตอบที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งอาจไม่เท่ากัน สม่่าเสมอ (Inconsistent) และอาจไม่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Near Optimal Solution) นอกจากนี้ยังได้พัฒนาสมการที่สามารถคำนวณรูปแบบปัญหาการใช้เหล็กเส้นความยาวมาตรฐานหลายขนาดความยาวมาตัดตามความยาวและจำนวนที่ต้องการเพื่อเพิ่มความหลากหลายของรูปแบบการตัดอันจะช่วยเพิ่มโอกาสที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมมากขึ้น โดยแบ่งขั้นตอนการหาคำตอบออกเป็นสองขั้นตอนเพื่อให้สมการฟังก์ชันเป้าหมายและสมการข้อจำกัดเป็นสมการเชิงเส้นตรงที่สามารถหาคำตอบ

เหมาะสมที่สุดได้ ซึ่งได้กำหนดให้รูปแบบการตัดที่ได้รับ การการคัดเลือกต้องได้ผลรวมของความยาวเศษเหล็กที่ เหลือจากการตัดและความยาว เศษเหล็กที่ตัดเกินกว่า จำนวนที่ต้องการน้อยที่สุด นอกจากนี้ความยาวของเศษ เหล็กที่เหลือจากการตัดในแต่ละรูปแบบถูกกำหนดให้ไม่ เกินความยาวที่สั้นที่สุดของเหล็กเส้นที่ต้องการทำให้มั่นใจ ได้ว่าเศษเหล็กที่เหลือไม่สามารถนำไปตัดซ้ำได้อีก

นอกจากนี้งานวิจัยได้นำเสนอแนวทางเชื่อมโยงข้อมูล เหล็กเส้นที่ตัดด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดกลับเข้าสู่พารามิเตอร์ของชิ้นส่วน โครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็กในแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และแปลง ข้อมูลเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) สำหรับ ใช้อ้างอิงรูปแบบการตัดและเสริมเหล็กที่ถูกต้อง

ตารางที่ 11 ตารางข้อมูลการตัด คัด และเสริมเหล็กเส้น

Rebar Schedule for Bar Cutting (Cut and Bend)																
Host Category	Partition	Host Level (EL.)	Host Grid	Host Code	Dia.	A (m.)	B (m.)	C (m.)	D (m.)	G (m.)	Shape Image	Bar Length (m.)	Qty	Total Bar Length (m.)	L10 Pattern	L12 Pattern
Foundation	F2-1	+0.00	4/B	F2	DB12	0.114	0.174	2.419	0.174	0.114		2.89	9	26.00	011-03-004	043-02-001, 048-01-004
Foundation	F2-2	+0.00	4/B	F2	DB12	0.114	0.174	1.424	0.174	0.114		1.89	18	34.09		037-01-001, 038-02-006, 039-02-003, 041-03-002, 042-02-001, 047-01-004, 050-01-001
Grand total												4.78	27	60.09		

ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมก่อสร้างในด้านการช่วยลดปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากกระบวนการตัดให้น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้การใช้ทรัพยากรมีประสิทธิภาพมากขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้าง ผลของจำนวนเศษเหล็กเส้นที่น้อยลงยังช่วยลดปัญหาขยะที่เกิดขึ้นจากงานก่อสร้างและปัญหาการขโมยเศษเหล็กเส้นโดยคนงานก่อสร้าง

งานวิจัยนี้มีคุณค่าทางวิชาการในแง่การพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถค้นหารูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่สามารถลดปริมาณเศษเหล็กเส้นที่เหลือจากการตัดได้มากขึ้น โดยสามารถใช้คำนวณปัญหาที่มีเหล็กเส้นความยาวมาตรฐานที่นำมาตัดหลายความยาวและการพัฒนาแนวทางการเชื่อมโยงข้อมูลเหล็กเส้นที่ได้จากการตัดด้วยรูปแบบที่คำนวณได้กับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ทำให้สามารถทราบเหล็กเส้นที่ตัดด้วยรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดแต่ละท่อนต้องตัดด้วยรูปทรง (Shape) แบบใด และต้องเสริมที่ตำแหน่งใดของ

โครงสร้างอาคาร ทำให้สามารถลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการทำงานลงได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Iron and Steel Intelligence Unit, "Thailand Steel Outlook 2020," Iron and Steel Institute of Thailand, Bangkok, Thailand, Jul. 2021 [Online]. Available: <https://iiu.isit.or.th/th/reports/Yearly%20Report.aspx>
- [2] S. Chinanuwatwong, "Reducing Waste from Cutting Reinforcing Steel in Construction Projects," Kasetart Journal Natural Science, vol. 34, no. 4, pp. 526–535, 2000, doi: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/240397/163946>
- [3] H. Dyckhoff, "A Typology of Cutting and Packing Problems," *European Journal of Operation Research*, vol. 44, no. 12, pp. 145–159, 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90350-K

- [4] M. Gradisar, K. Miroljub, R. Gortan and J. Joze, “A Sequential Heuristic Procedure for One-Dimensional Cutting,” *European Journal of Operational Research*, vol. 114, no. 13, pp. 557–568, 1999, doi: 10.1016/S0377-2217(98)00140-4
- [5] J. Coffman, E. M. Garey and D. S. Johnson, “Approximation Algorithms for Bin-Packing: An Updated Survey,” *Algorithm Design for Computer System Design*, vol. 284, pp. 49–106, 1984, doi: 10.1007/978-3-7091-4338-4_3
- [6] Y. Cui and Y. Yang, “A heuristic for the one-dimensional cutting stock problem with usable leftover,” *European Journal of Operational Research*, vol. 204, no. 12, pp. 245–250, 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.10.028
- [7] C. R. Goncalo, A. S. Sergio and M. Marlos, “Modified Greedy Heuristic for the one-dimensional cutting stock problem,” *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 41, no. 12, pp. 657–674, 2021, doi: 10.1007/s10878-021-00695-4
- [8] R. Vahrenkamp, “Random Search in the One-Dimensional Cutting Stock Problem,” *European Journal of Operation Research*, vol. 95, no. 11, pp. 191–200, 1996, doi: 10.1016/0377-2217(95)00198-0
- [9] V. Benjaoran, “Trim Loss Minimization for Construction Reinforcement Steel with Oversupply Constraints,” *Journal of Advanced Management Science*, vol. 1, no. 13, pp. 313–316, 2013, doi: 10.12720/joams.1.3.313-316
- [10] V. Benjaoran and Bhokha, “Three-Step Solution for Cutting Stock Problem of Construction Steel Bar,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 115, pp. 1239–1247, 2014, doi: 10.1007/s12205-014-0238-3
- [11] A. Porwal and N. Hewage, “Building Information Modeling–Based Analysis to Minimize Waste Rate of Structural Reinforcement,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 18, pp. 943–954, 2012, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000508
- [12] M. Mangal and J. C. Cheng, “Automated Optimization of Steel Reinforcement in RC Building Frames Using Building Information Modeling and Hybrid Genetic Algorithm,” *Automation in Construction*, vol. 90, pp. 39–57, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.01.013
- [13] M. T. H. Khondoker, “Automated Reinforcement Trim Waste Optimization in RC Frame Structures Using Building Information Modeling and Mixed-Integer Linear Programming,” *Automation in Construction*, vol. 124, pp. 103599, 2021 doi: 10.1016/j.autcon.2021.103599
- [14] The Association of Siamese Architects under Royal Patronage, *Thailand BIM Guideline*, Plus press Company Limited, 2015, ch. 1–2, pp. 2–14
- [15] I. Autodesk, “Dynamo Developer Resources.” dynamobim.org. <https://dynamobim.org/>. (accessed Aug. 1, 2021)
- [16] T. E. Seghier, Y. W. Lim, M. H. Ahmad and W. O. Samuel, “Building Envelope Thermal Performance Assessment Using Visual Programming and BIM, based on ETTV Requirement of Green Mark and GreenRE,” *International Journal of Built Environment and Sustainability*, vol. 4, no. 3, pp. 227–235, 2017, doi: 10.11113/ijbes.v4.n3.216
- [17] D. Team, “DiRoots Connecting the Dots,” diroots.com. <https://diroots.com/revit-plugins/revit-to-excel-sheetlink/>. (accessed Aug. 1, 2021)