

วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณโครงสร้างหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด
โดยแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม กรณีศึกษา: บ้านภูหมอก เขาค้อ
Minimizing Cutting Loses in Constructing a Steel Roof Through
the Use of Linear Programming Models
A Case Study of Pumok Home, Khaokho

ศรียรรณ ฤกษ์ฤทธิ์^{1*} และชนิษฐา อินชัย²

^{1,2} คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

โทร: 090-9292119 โทรสาร:(055) 963201 E-mail: srivannr@nu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยเรื่อง “วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณโครงสร้างหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม กรณีศึกษา บ้านภูหมอก เขาค้อ” เป็นงานวิจัยโมเดลการตัดเหล็ก โดยใช้แบบบ้านภูหมอก เขาค้อ เป็นกรณีศึกษา มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างแบบสามมิติโครงสร้างหลังคา และหาวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณให้เหลือเศษน้อยที่สุด มีประโยชน์ในการบริหารและควบคุมค่าใช้จ่าย ในงานก่อสร้าง การวิจัยดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้ 1) สร้างแบบสามมิติจากแบบก่อสร้างจริงด้วย โปรแกรม SketchUp 2) ถอดแบบรายการชิ้นส่วนโครงหลังคาเหล็ก 3) จัดหุวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณ ทุกขนาดที่ใช้ประกอบเป็นโครงหลังคา 4) สร้างแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม 5) วิเคราะห์หาผลลัพธ์ วิธีการตัดเหล็กให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด

แบบบ้านที่ใช้เป็นกรณีศึกษามีลักษณะเป็นบ้านทรงโมเดิร์นทันสมัย หลังคาเพิงหมาแหงน 2 ระดับ โครงสร้างหลังคาประกอบด้วยเหล็ก U 125 x 65 x 6 x 8 มม., C 100 x 50 x 20 x 3.2 มม., □ 100 x 50 x 3.2 มม., □ 75 x 38 x 2.3 มม., □ 75 x 75 x 2.3 มม., และ □ 50 x 50 x 2.3 มม. ผลการวิจัยพบว่า วิธีการตัดเหล็กความยาวมาตรฐาน 6 เมตร ให้ความยาวและจำนวนตามความต้องการใช้งานดังนี้ เหล็กรูปตัวยู U 125 x 65 x 6 x 8 มม. ใช้เหล็กมาตรฐานจำนวน 6 ท่อน ตัด 5 วิธี เหลือเศษน้อยที่สุด 4.14 เมตร เหล็กรูปตัวซี C 100 x 50 x 20 x 3.2 มม. ใช้เหล็กมาตรฐานจำนวน 30 ท่อน ตัด 11 วิธี เหลือเศษน้อยที่สุด 17.77 เมตร เหล็กแป๊บแบน □ 100 x 50 x 3.2 มม. ใช้เหล็กมาตรฐานจำนวน 10 ท่อน ตัด 5 วิธี เหลือเศษน้อยที่สุด 1.93 เมตร เหล็กแป๊บแบน □ 75 x 38 x 2.3 มม. ใช้เหล็กมาตรฐานจำนวน 4 ท่อน ตัด 4 วิธี เหลือเศษน้อยที่สุด 4.26 เมตร เหล็กแป๊บแบน □ 75 x 75 x 2.3 มม. ใช้เหล็กมาตรฐานจำนวน 2 ท่อน ตัด 2 วิธี เหลือเศษน้อยที่สุด 5.08 เมตร เหล็กแป๊บแบน □ 50 x 50 x 2.3 มม. ใช้เหล็กมาตรฐานจำนวน 9 ท่อน ตัด 3 วิธี เหลือเศษน้อยที่สุด 1.80 เมตร

คำสำคัญ : เหล็กรูปพรรณ, เสียเศษเหล็ก, แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม

Abstract

The purpose of this research is to investigate the minimization of steel wasted when cutting materials for the construction of a roof structure. The findings will be useful for management and for cost control. The research involved five stages: 1) produce a 3D model of the roof structure in SketchUp; 2) use this model to generate a list of required materials; 3) generate a list of the combination of all steel cutting methods; 4) construct an integer linear programming model; and 5) analyze the optimum cutting methods to minimize trim loss.

The subject building was a modern home with a dual-level backward sloping roof. The steel roof structure consisted of the following steel sections: U 125 x 65 x 6 x 8 mm., C 100 x 50 x 20 x 3.2 mm., □ 100 x 50 x 3.2 mm., □ 75 x 38 x 2.3 mm., □ 75 x 75 x 2.3 mm. and □ 50 x 50 x 2.3 mm. It was found that by using steel sections with a standard length of 6 metres, the optimum results for cutting were: 6 lengths of U 125 x 65 x 6 x 8 mm. cut in 5 ways, which would generate the optimum trim loss of 4.14 metres; 30 pieces of C 100 x 50 x 20 x 3.2 mm. cut in 11 ways, which would generate the optimum trim loss of 17.77 metres; 10 lengths of □ 100 x 50 x 3.2 mm. cut in 5 ways, which would generate the optimum trim loss of 1.93 metres; 4 lengths of □ 75 x 38 x 2.3 mm. cut in 4 ways, which would generate the optimum trim loss of 4.26 metres; 2 lengths of □ 75 x 75 x 2.3 mm. cut in 2 ways, which would generate the optimum trim loss of 5.08 metres; and 9 lengths of □ 50 x 50 x 2.3 mm. cut in 3 ways, which would generate the optimum trim loss of 1.80 metres.

Keywords : Structural Steel, Trim Loss Steel, Integer Linear Programming Models

1. บทนำ

การบริหารจัดการงานก่อสร้างมีความสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป้าหมายของการบริหารจัดการงานก่อสร้างคือ การควบคุมต้นทุนในการก่อสร้างไม่ว่าจะเป็น วัสดุ แรงงาน อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งการจัดการปัญหาและอุปสรรคทั้งหมดเพื่อให้งานสำเร็จตามจุดมุ่งหมาย การนำเหล็กมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างมีมานานมากกว่า 2 ศตวรรษ เหล็กได้รับความนิยมใช้ในงานก่อสร้าง เพราะเป็นวัสดุที่มีความสม่ำเสมอและมีความแน่นอนสูง ผลิตด้วยกรรมวิธีในอุตสาหกรรมที่มีระบบการควบคุมคุณภาพที่สมบูรณ์ ปัจจุบันนิยมนำเหล็กรูปพรรณมาใช้ทำโครงหลังคาบ้าน เพราะเหล็กรูปพรรณเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องตลาด อีกทั้งมีรูปแบบและขนาดต่าง ๆ ให้เลือกมากมายเพื่อให้เหมาะสมกับการรับน้ำหนักและเหมาะสมกับรูปทรงที่แตกต่างกันของบ้านแต่ละหลัง นอกจากนี้เหล็กรูปพรรณยังเป็นวัสดุที่ให้ความแข็งแรงและคงรูป ปราศจากปัญหาเรื่องปลวก เนื่องจากเหล็กรูปพรรณมีลักษณะเป็นท่อนเหล็กที่มีความยาวมาตรฐาน 6 เมตร ในการใช้งานจะต้องนำมาตัดให้มีขนาดความยาวตามความต้องการ ทำให้เกิดปัญหาการสูญเสียเศษเหล็กจากการตัด นับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญมีผลกระทบต่อต้นทุน

การวิจัยในอดีตไม่ได้แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดการประกอบโครงสร้างเหล็กหลังคา จึงทำให้การทำงานมีความผิดพลาดอยู่เสมอ เนื่องจากแรงงานก่อสร้างของไทยโดยเฉพาะแรงงานท้องถิ่นส่วนใหญ่ยังขาดความรู้ความชำนาญในงานก่อสร้าง การสื่อสารที่สามารถทำให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าใจได้ง่ายมองเห็นภาพชัดเจนก็เป็นสิ่งสำคัญที่ไม่ควรมองข้าม การสื่อสารด้วยภาพสามมิติเสมือนจริงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหาความเข้าใจผิดของผู้ปฏิบัติงาน จึงเป็นความแปลกใหม่ของการวิจัยที่มีการใช้โปรแกรม SketchUp สร้างภาพสามมิติเสมือนจริงของโครงหลังคาเพื่อประกอบการใช้งาน

จากปัญหาการสูญเสียเศษเหล็กจากการตัดและปัญหาการสื่อสารที่ก่อให้เกิดความผิดพลาด ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณโครงหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม พร้อมทั้งสร้างแบบสามมิติและถอดแบบรายละเอียดรายการโครงหลังคาเหล็กเพื่อใช้ประกอบแบบการก่อสร้าง และใช้เป็นประโยชน์ในการสื่อสารและการวางแผนการปฏิบัติงานให้รวดเร็วมีประสิทธิภาพ โดยมีแบบบ้าน ภูหมอก โครงการภูหมอกวิลเลจ อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นกรณีศึกษา

2. วัตถุประสงค์

2.1 สร้างแบบสามมิติและถอดแบบรายการโครงหลังคาเหล็กประกอบแบบการก่อสร้างบ้าน ภูหมอก โครงการภูหมอกวิลเลจ อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

2.2 สร้างแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มของวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณโครงหลังคาเหล็กให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด ของบ้านภูหมอก โครงการภูหมอกวิลเลจ อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณโครงหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยใช้กรณีศึกษานบ้านภูหมอก เขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ มีขั้นตอนดังนี้

3.1 การสร้างแบบสามมิติโครงหลังคาเหล็ก

การสร้างแบบสามมิติโครงหลังคาเหล็กบ้านภูหมอก เขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์เพื่อใช้ในการสื่อสารในการปฏิบัติงานให้มีความเข้าใจตรงกันและเกิดประสิทธิภาพต่อการทำงาน มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

1) ศึกษารายละเอียดโครงหลังคาเหล็กจากแบบแปลนบ้านภูหมอก เขาค้อ ที่วิศวกรได้ออกแบบไว้

2) ดำเนินการสร้างแบบสามมิติโครงหลังคาเหล็กบ้านภูหมอก เขาค้อ ด้วยโปรแกรม SketchUp ให้ตรงกับแบบที่วิศวกรกำหนด

3.2 การถอดแบบรายการโครงหลังคาเหล็ก

การถอดแบบรายการโครงหลังคาเหล็กแบบบ้านภูหมอก เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบแบบการก่อสร้าง มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

1) ศึกษารายละเอียดโครงหลังคาเหล็กจากแบบแปลนบ้านภูหมอก เขาค้อ ที่วิศวกรได้ออกแบบได้ออกแบบไว้

2) ดำเนินการถอดแบบรายการโครงหลังคาเหล็กสำหรับประกอบแบบก่อสร้าง ประกอบด้วยประเภทเหล็กgrupพรรณ ตำแหน่งหลังคา ตำแหน่งโครงสร้าง ขนาดความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน

3) นำเสนอรายการโครงหลังคาเหล็กแบบบ้านญหมอก เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการก่อสร้าง ด้วยตารางทางเดียว

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลเหล็กgrupพรรณโครงหลังคา

การเก็บรวบรวมข้อมูลเหล็กโครงหลังคาเหล็กบ้านญหมอก เขาค้อ เพื่อการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มของวิธีการตัดเหล็กโครงหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด อาศัยข้อมูลจากการถอดแบบรายการโครงหลังคาเหล็กที่ใช้ประกอบแบบการก่อสร้าง โดยประกอบด้วยข้อมูลประเภทของเหล็กgrupพรรณ ขนาดความยาว และจำนวนที่ต้องการใช้งาน

3.4 การจัดห่วิธีการตัดเหล็กgrupพรรณโครงหลังคา

ก่อนดำเนินการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มของวิธีการตัดเหล็กโครงหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด มีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์รายละเอียดของจำนวนวิธีในการจัดห่วิธีการทั้งหมดที่เป็นไปได้จากการตัดเหล็กgrupพรรณ ซึ่งมีความยาวมาตรฐาน 6 เมตร เพื่อให้ได้ขนาดความยาวตามความต้องการใช้งาน โดยอาศัยข้อมูล ประเภทของเหล็กgrupพรรณ ขนาดความยาว และจำนวนที่ต้องการใช้งาน

3.5 การสร้างแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม

การสร้างแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม มีจุดประสงค์เพื่อให้เศษเหล็กรวมน้อยที่สุด อาศัยข้อมูลจากการถอดแบบรายการโครงหลังคาเหล็กที่ใช้ประกอบแบบการก่อสร้าง โดยประกอบด้วยข้อมูล ประเภทของเหล็กgrupพรรณ ขนาดความยาว และจำนวนที่ต้องการใช้งาน รายละเอียดของจำนวนวิธีในการจัดห่วิธีการทั้งหมดที่เป็นไปได้จากการตัดเหล็กgrupพรรณ ซึ่งมีความยาวมาตรฐาน 6 เมตร เพื่อให้ได้ขนาดความยาวตามความต้องการใช้งาน และรูปแบบมาตรฐานทั่วไปของแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม มีดังนี้

กำหนดให้

Z คือ ผลรวมทั้งหมดของเศษเหล็กจากการตัด

a_{ij} คือ จำนวนท่อนของเหล็กgrupพรรณที่มีขนาดความยาว l_j

ซึ่งตัดโดยรูปแบบการตัดวิธีที่ j

x_j คือ จำนวนท่อนเหล็กgrupพรรณขนาดมาตรฐานที่ใช้ตัดโดยรูปแบบ

การตัดวิธีที่ j

q_i คือ จำนวนท่อนเหล็กgrupพรรณที่มีขนาดความยาว l_i

c_j คือ ขนาดความยาวของเศษเหล็กจากการตัดเหล็กgrupพรรณขนาด

มาตรฐาน

โดยรูปแบบการตัดวิธีที่ j

ฟังก์ชันจุดประสงค์

$$\text{Minimize } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

เงื่อนไขบังคับ

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = q_i \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n$$

ข้อจำกัดไม่เป็นลบ $x_j \geq 0$ and integer

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม ของวิธีการตัดเหล็ก รูปพรรณโครงสร้างหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด สำหรับโครงหลังคาเหล็กแบบบ้านภูหมอกเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ใช้โปรแกรม Solver ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม Microsoft Excel

3.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับค่าคำนวณทั่วไป

นำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มไปเปรียบเทียบกับค่าที่วิศวกรคำนวณตามแนววิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งเป็นค่าคำนวณทั่วไป

4. ผลการวิจัย

การวิจัย เรื่องวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณโครงสร้างหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม กรณีศึกษา บ้านภูหมอก มีผลการวิจัยนำเสนอเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 แบบสามมิติโครงสร้างหลังคาเหล็ก

แบบสามมิติโครงสร้างหลังคาเหล็กแบบบ้านภูหมอก โครงการภูหมอกวิลเลจ อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ สร้างด้วยโปรแกรม SketchUp ปรากฏดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบสามมิติโครงสร้างหลังคาเหล็กแบบบ้านภูหมอก

ตอนที่ 2 แบบรายการโครงหลังคาเหล็กประกอบการก่อสร้าง

โครงสร้างหลังคาเหล็กของแบบบ้านภูหมอก อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ประกอบด้วย เหล็กรูปพรรณ เหล็กรูปตัวยู ขนาด 125 x 65 x 6 x 8 มิลลิเมตร เหล็กรูปตัวซี ขนาด 100 x 50 x 20 x 3.2 มิลลิเมตร เหล็กแป๊บแบน ขนาด 100 x 50 x 3.2 มิลลิเมตร เหล็กแป๊บแบน ขนาด 75 x 38 x 2.3 มิลลิเมตร เหล็กแป๊บสี่เหลี่ยม ขนาด 75 x 75 x 2.3 มิลลิเมตร เหล็กแป๊บสี่เหลี่ยม

ขนาด 50 x 50 x 2.3 มิลลิเมตร โดยมีรายละเอียดของแบบรายการโครงหลังคาเหล็กประกอบแบบ การก่อสร้างบ้านญะหมอก อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ตามประเภทของเหล็กgrupพรรณ ดังแสดงใน ตารางที่ 1 ถึง ตารางที่ 6

ตารางที่ 1 รายการเหล็กgrupพรรณรูปตัว U 125 x 65 x 6 x 8 มิลลิเมตร จำแนกตามตำแหน่ง หลังคา ตำแหน่งโครงสร้าง ความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน

ตำแหน่งหลังคา	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)	ความยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)
หลังคาบ้าน	อะเส line B	6.00	2	4.15	1
หลังคาบ้าน	อะเส line C	6.00	2	4.15	1
หลังคาบ้าน	อะเส line D	6.00	2	4.15	1
หลังคาบ้าน	อะเส line F	6.00	2	4.15	1
หลังคาบ้านฝั่งห้องนอน	จันทัน line 1	6.00	2	3.39	1
หลังคาบ้านฝั่งห้องนอน	จันทัน line 2	6.00	2	3.39	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์สูง)	จันทันบน line 3	6.00	2	2.22	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์สูง)	จันทันบน line 4	6.00	2	2.22	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์สูง)	จันทันล่าง line 3	6.00	2	1.81	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์สูง)	จันทันล่าง line 4	6.00	2	0.71	1
หลังคาบ้านฝั่งห้องรับแขก	จันทัน line 5	6.00	2	0.71	1
หลังคาบ้านฝั่งห้องรับแขก	จันทัน line 6	6.00	2	0.71	1
หลังคาบ้าน	อะเส line E	6.00	2	0.10	1

ตารางที่ 2 รายการเหล็กgrupพรรณรูปตัวซี C 100 x 50 x 20 x 3.2 มิลลิเมตร จำแนกตามตำแหน่ง หลังคา ตำแหน่งโครงสร้าง ความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน

ตำแหน่งหลังคา	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)
หลังคาบ้านฝั่งห้องนอน	แป line F (2 ลำดับ ท้าย)	6.00	-	5.85	2
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์ต่ำ)	แปทั้งหมด	6.00	-	5.32	16
หลังคาบ้านฝั่งห้องนอน	แป ระหว่าง line E-F	6.00	-	5.00	1
หลังคาครัว	แปทั้งหมด	6.00	-	2.40	11
หลังคาบ้านฝั่งห้องนอน	แป line 2-3 และ line E-F	6.00	-	2.10	2
หลังคาบ้านฝั่งห้องนอน	แปทั้งหมด line B-E	6.00	14	0.99	14

ตารางที่ 2 รายการเหล็กรูปพรรณรูปตัวซี C 100 x 50 x 20 x 3.2 มิลลิเมตร จำแนกตามตำแหน่ง หลังคา ตำแหน่งโครงสร้าง ความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน (ต่อ)

ตำแหน่งหลังคา	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)
หลังคาบ้านฝั่งห้องรับแขก	แปทั้งหมด line B-E	6.00	15	0.99	15
หลังคาบ้าน	เหล็กยึดเสา	6.00	-	0.50	1
หลังคาบ้าน	เหล็กยึดเสา	6.00	-	0.50	1

ตารางที่ 3 รายการเหล็กรูปพรรณแป๊บแบน □ 100 x 50 x 3.2 มิลลิเมตร จำแนกตามตำแหน่ง หลังคา ตำแหน่งโครงสร้าง ความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน

ตำแหน่งหลังคา	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)
หลังคาบ้าน (แฝงค้ำล่าง)	เหล็กแนวนอนล่าง	6.00	-	5.86	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (แฝงค้ำบน)	เหล็กแนวนอน line B	6.00	-	4.09	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (แฝงค้ำบน)	เหล็กแนวนอน line C	6.00	-	4.09	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (แฝงค้ำบน)	เหล็กแนวนอน line D	6.00	-	4.09	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (แฝงค้ำบน)	เหล็กแนวนอน line E	6.00	-	4.09	1
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทริสต์สูง)	เหล็กตั้ง line 3	6.00	-	0.84	14
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทริสต์สูง)	เหล็กตั้ง line 4	6.00	-	0.84	14
หลังคาบ้านตรงกลาง (แฝงค้ำบน)	เหล็กตั้ง line B	6.00	-	0.84	3
หลังคาบ้านตรงกลาง (แฝงค้ำบน)	เหล็กตั้ง line C	6.00	-	0.84	3
หลังคาบ้านตรงกลาง (แฝงค้ำบน)	เหล็กตั้ง line D	6.00	-	0.84	3
หลังคาบ้านตรงกลาง (แฝงค้ำบน)	เหล็กตั้ง line E	6.00	-	0.84	3
หลังคาบ้าน (แฝงค้ำล่าง)	เหล็กตั้ง	6.00	-	0.45	5

ตารางที่ 4 รายการเหล็กรูปพรรณแป๊บแบน □ 75 x 38 x 2.3 มิลลิเมตร จำแนกตามตำแหน่ง หลังคาตำแหน่งโครงสร้าง ความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน

ตำแหน่งหลังคา	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)
หลังคาครัว (ทริสต์ 2 แฉง)	เหล็กแนวนอนบน	6.00	2	2.98	2
หลังคาครัว (ทริสต์ 2 แฉง)	เหล็กแนวนอนล่าง	6.00	2	1.29	2
หลังคาครัว (ทริสต์ 2 แฉง)	เหล็กตั้ง ช่อง 1	6.00	-	1.29	2
หลังคาครัว (ทริสต์ 2 แฉง)	เหล็กตั้ง ช่อง 2	6.00	-	1.29	2

ตารางที่ 4 รายการเหล็กรูปพรรณแป๊บแบน $\square$ 75 x 38 x 2.3 มิลลิเมตร จำแนกตามตำแหน่ง
หลังคา ตำแหน่งโครงสร้าง ความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน (ต่อ)

ตำแหน่งหลังคา	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)
หลังคาครีว (ทรีสต์ 2 แผง)	เหล็กตั้ง ช่อง 3	6.00	-	0.93	2
หลังคาครีว (ทรีสต์ 2 แผง)	เหล็กตั้ง ช่อง 4	6.00	-	0.93	2
หลังคาครีว (ทรีสต์ 2 แผง)	เหล็กตั้ง ช่อง 5	6.00	-	0.58	2
หลังคาครีว (ทรีสต์ 2 แผง)	เหล็กตั้ง ช่อง 6	6.00	-	0.58	2

ตารางที่ 5 รายการเหล็กรูปพรรณแป๊บสี่เหลี่ยม $\square$ 75 x 75 x 2.3 มิลลิเมตร จำแนกตามตำแหน่ง
หลังคา ตำแหน่งโครงสร้าง ความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน

ตำแหน่งหลังคา	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)	ความยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)
หลังคาครีว	เหล็กยึดระหว่างทรีสต์	6.00	-	1.73	4

ตารางที่ 6 รายการเหล็กรูปพรรณแป๊บสี่เหลี่ยม $\square$ 50 x 50 x 2.3 มิลลิเมตร จำแนกตามตำแหน่ง
หลังคา ตำแหน่งโครงสร้าง ความยาว และจำนวน ที่ต้องการใช้งาน

ตำแหน่งหลังคา	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)	ความ ยาว (เมตร)	จำนวน (ท่อน)
หลังคาบ้านตรงกลาง (แผงค้ำบน)	เหล็กทแยง line B	6.00	-	1.28	4
หลังคาบ้านตรงกลาง (แผงค้ำบน)	เหล็กทแยง line C	6.00	-	1.28	4
หลังคาบ้านตรงกลาง (แผงค้ำบน)	เหล็กทแยง line D	6.00	-	1.28	4
หลังคาบ้านตรงกลาง (แผงค้ำบน)	เหล็กทแยง line E	6.00	-	1.28	4
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์สูง)	เหล็กทแยง line 3	6.00	-	1.07	10
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์สูง)	เหล็กทแยง line 4	6.00	-	1.07	10
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์สูง)	เหล็กทแยง line 3	6.00	-	0.86	6
หลังคาบ้านตรงกลาง (ทรีสต์สูง)	เหล็กทแยง line 4	6.00	-	0.86	6

ตอนที่ 3 วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณโครงหลังคาเหล็ก

วิธีการตัดเหล็กโครงหลังคาแบบบ้านภูมอก อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ตามประเภท
ของเหล็กที่ใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 7 ถึงตารางที่ 12

ตารางที่ 7 วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณรูปตัว U 125 x 65 x 6 x 8 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดความยาวตามความต้องการใช้งาน โดยเสียเศษน้อยที่สุด

วิธี	ขนาดความยาวที่ตัดสำหรับใช้งาน (เมตร)	เศษเหล็ก (เมตร)	เหล็กมาตรฐานที่ใช้ตัด (ท่อน)	เศษเหล็ก รวม (เมตร)
1	4.15	1.85	1	1.85
2	4.15 1.81	0.04	1	0.04
3	4.15 0.71	1.14	1	1.14
4	4.15 0.71 0.71 0.10	0.33	1	0.33
5	3.39 2.22	0.39	2	0.78
รวมทั้งหมด			6	4.14

จากตารางที่ 7 พบว่าวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณรูปตัว U ขนาด 125 x 65 x 6 x 8 มิลลิเมตร ที่มีขนาดความยาวมาตรฐาน 6 เมตร มีทั้งหมด 5 วิธี ตามรายละเอียดข้างต้น ได้ขนาดความยาว 4.15, 3.39, 2.22, 1.81, 0.71 และ 0.10 เมตร เป็นจำนวนรวมทั้งหมด 4, 2, 2, 1, 3, และ 1 ท่อน ตามลำดับ โดยมีเศษเหล็กน้อยที่สุดรวม 4.14 เมตร

ตารางที่ 8 วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณรูปตัวซี C 100 x 50 x 20 x 3.2 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดความยาวตามความต้องการใช้งาน โดยเสียเศษน้อยที่สุด

วิธี	ขนาดความยาวที่ตัดสำหรับใช้งาน (เมตร)	เศษเหล็ก (เมตร)	เหล็กมาตรฐานที่ใช้ตัด (ท่อน)	เศษเหล็ก รวม (เมตร)
1	5.85	0.15	2	0.30
2	5.32	0.68	15	10.20
3	5.32 0.55	0.13	1	0.13
4	5.00 0.99	0.01	1	0.01
5	2.40 2.40 0.99	0.21	3	0.63
6	2.40 2.10 0.99	0.51	2	1.02
7	2.40 0.99	2.61	1	2.61
8	2.40 0.99 0.99	1.62	1	1.62
9	2.40 0.99 0.99 0.99 0.55	0.08	1	0.08
10	0.99 0.99 0.99 0.99 0.99	1.05	1	1.05
11	0.99 0.99 0.99 0.99 0.99 0.99	0.06	2	0.12
รวมทั้งหมด			30	17.77

จากตารางที่ 8 พบว่าวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณรูปตัวซี ขนาด 100 x 50 x 20 x 3.2 มิลลิเมตร ที่มีขนาดความยาวมาตรฐาน 6 เมตร มีทั้งหมด 11 วิธี ใช้เหล็กที่มีขนาดความยาวมาตรฐานจำนวนทั้งหมด 30 ท่อน นำมาตัดได้ขนาดความยาว 5.85, 5.32, 5.00, 2.40, 2.10, 0.99

และ 0.55 เมตร เป็นจำนวนรวมทั้งหมด 2, 16, 1, 11, 2, 29 และ 2 ท่อน ตามลำดับ โดยมีเศษเหล็กน้อยที่สุดรวม 17.77 เมตร

ตารางที่ 9 วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแป้นแบน ขนาด 100 x 50 x 3.2 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดความยาวตามความต้องการใช้งาน โดยเสียเศษน้อยที่สุด

วิธี	ขนาดความยาวที่ตัดสำหรับใช้งาน (เมตร)	เศษ เหล็ก (เมตร)	เหล็ก มาตรฐาน ที่ใช้ตัด (ท่อน)	เศษเหล็ก รวม (เมตร)
1	5.86	0.14	1	0.14
2	4.09 0.84 0.84	0.23	4	0.92
3	0.84 0.84 0.84 0.84 0.84 0.84 0.84	0.12	2	0.24
4	0.84 0.84 0.84 0.84 0.84 0.84 0.45	0.51	1	0.51
5	0.84 0.84 0.84 0.84 0.84 0.84 0.45 0.45	0.06	2	0.12
รวมทั้งหมด			10	1.93

จากตารางที่ 9 พบว่าวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแป้นแบน ขนาด 100 x 50 x 3.2 มิลลิเมตร ที่มีขนาดความยาวมาตรฐาน 6 เมตร มีทั้งหมด 5 วิธี ใช้เหล็กที่มีขนาดความยาวมาตรฐานจำนวนทั้งหมด 10 ท่อน นำมาตัดได้ขนาดความยาว 5.86, 4.09, 0.84 และ 0.45 เมตร เป็นจำนวนรวมทั้งหมด 1, 4, 40 และ 5 ท่อน ตามลำดับ โดยมีเศษเหล็กน้อยที่สุดรวม 1.93 เมตร

ตารางที่ 10 วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแป้นแบน ขนาด 75 x 38 x 2.3 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดความยาวตามความต้องการใช้งาน โดยเสียเศษน้อยที่สุด

วิธี	ขนาดความยาวที่ตัดสำหรับใช้งาน (เมตร)	เศษ เหล็ก (เมตร)	เหล็ก มาตรฐาน ที่ใช้ตัด (ท่อน)	เศษเหล็ก รวม (เมตร)
1	2.98 1.29 0.93 0.58	0.22	1	0.22
2	2.98 0.58 0.58	1.86	1	1.86
3	1.29 1.29 1.29 1.29 0.58	0.26	1	0.26
4	1.29 0.93 0.93 0.93	1.92	1	1.92
รวมทั้งหมด			4	4.26

จากตารางที่ 10 พบว่าวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแป้นแบน ขนาด 75 x 38 x 2.3 มิลลิเมตร ที่มีขนาดความยาวมาตรฐาน 6 เมตร มีทั้งหมด 4 วิธี ใช้เหล็กที่มีขนาดความยาวมาตรฐานจำนวนทั้งหมด 4 ท่อน นำมาตัดได้ขนาดความยาว 2.98, 1.29, 0.93 และ 0.58 เมตร เป็นจำนวนรวมทั้งหมด 2, 6, 4 และ 4 ท่อน ตามลำดับ โดยมีเศษเหล็กน้อยที่สุดรวม 4.26 เมตร

ตารางที่ 11 วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแป๊บเหล็มน ขนาด 75 x 75 x 2.3 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดความยาวตามความต้องการใช้งาน โดยเสียเศษน้อยที่สุด

วิธี	ขนาดความยาวที่ตัดสำหรับใช้งาน (เมตร)	เศษเหล็ก (เมตร)	เหล็กมาตรฐานที่ใช้ตัด (ท่อน)	เศษเหล็กรวม (เมตร)
1	1.73	4.27	1	4.27
2	1.73 1.73 1.73	0.81	1	0.81
รวมทั้งหมด			2	5.08

จากตารางที่ 11 พบว่าวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแป๊บเหล็มน ขนาด 75 x 75 x 2.3 มิลลิเมตร ที่มีขนาดความยาวมาตรฐาน 6 เมตร มีทั้งหมด 2 วิธี ใช้เหล็กที่มีขนาดความยาวมาตรฐานจำนวนทั้งหมด 2 ท่อน นำมาตัดได้ขนาดความยาว 1.73 เมตร เป็นจำนวนรวมทั้งหมด 4 ท่อน โดยมีเศษเหล็กน้อยที่สุดรวม 5.08 เมตร

ตารางที่ 12 วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแป๊บเหล็มน ขนาด 50 x 50 x 2.3 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดความยาวตามความต้องการใช้งาน โดยเสียเศษน้อยที่สุด

วิธี	ขนาดความยาวที่ตัดสำหรับใช้งาน (เมตร)	เศษเหล็ก (เมตร)	เหล็กมาตรฐานที่ใช้ตัด (ท่อน)	เศษเหล็กรวม (เมตร)
1	1.28 1.28 1.28 1.28	0.88	1	0.88
2	1.28 1.28 1.28 1.07 1.07	0.02	4	0.08
3	1.07 1.07 1.07 0.86 0.86 0.86	0.21	4	0.84
รวมทั้งหมด			9	1.80

จากตารางที่ 12 พบว่าวิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแป๊บเหล็มน ขนาด 50 x 50 x 2.3 มิลลิเมตร ที่มีขนาดความยาวมาตรฐาน 6 เมตร มีทั้งหมด 3 วิธี ใช้เหล็กที่มีขนาดความยาวมาตรฐานจำนวนทั้งหมด 9 ท่อน นำมาตัดได้ขนาดความยาว 1.28, 1.07 และ 0.86 เมตร เป็นจำนวนรวมทั้งหมด 16, 20 และ 12 ท่อน ตามลำดับ โดยมีเศษเหล็กน้อยที่สุดรวม 1.80 เมตร

เมื่อนำผลการวิจัยครั้งนี้เปรียบเทียบกับความคิดปริมาณวัสดุวิธีเดิมทั่วไปโดยวิศวกรคำนวณความยาวเพื่อตัดเชื่อมในอัตราร้อยละ 10 – 15 พบว่า วิธีเดิมใช้จำนวนเหล็กที่มีขนาดความยาวมาตรฐานดังนี้ เหล็ก U 125 x 65 x 6 x 8 มิลลิเมตร จำนวน 7 ท่อน เหล็ก C 100 x 50 x 20 x 3.2 มิลลิเมตร จำนวน 31 ท่อน เหล็ก □ 100 x 50 x 3.2 มิลลิเมตร จำนวน 11 ท่อน เหล็ก □ 75 x 38 x 2.3 มิลลิเมตร จำนวน 4 ท่อน เหล็ก □ 75 x 75 x 2.3 มิลลิเมตร จำนวน 2 ท่อน เหล็ก □ 50 x 50 x 2.3 มิลลิเมตร จำนวน 10 ท่อน ดังนั้นการตัดเหล็กโดยวิธีที่วิจัยครั้งนี้ใช้ปริมาณเหล็กน้อยกว่า ซึ่งหมายความว่า การดำเนินการก่อสร้างสามารถประหยัดค่าใช้จ่าย นับว่าเป็นผลดีด้านเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งเป็นการวางแผนการตัดเหล็กให้เกิดความรวดเร็วมีประสิทธิภาพ ไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานตัดเหล็กตามใจชอบ เพราะวิธีที่วิจัยนี้ได้สร้างแบบที่เข้าใจง่ายและตรงตามความต้องการทุกประการ นับว่าเป็นผลดีด้านการควบคุมงาน และด้านการบริหารจัดการ ซึ่งผลงานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้โดย

ผู้รับเหมาก่อสร้างบ้านหมอก เขาค้อ ได้ผลดีต่อการบริหารและควบคุมงาน จึงกล่าวได้ว่าผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

5. สรุปผลและอภิปรายผล

จากกรณีศึกษาแบบบ้านหมอกสรุปได้ว่าการบริหารงานก่อสร้างด้วยการลดต้นทุนทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากการควบคุมให้มีการตัดเหล็กโดยมีเศษเหล็กน้อยที่สุด กระบวนการเริ่มจากการใช้โปรแกรม SketchUp เขียนภาพโครงหลังคาสามมิติเพื่อแสดงโครงสร้างหลังคา อันเป็นการแก้ปัญหาที่อาจจะเกิดความเข้าใจผิดของช่างประกอบโครงหลังคา จากภาพสามมิติทำให้ทราบถึงความยาวเหล็กแต่ละขนาดได้อย่างถูกต้อง จากนั้นได้ทำการจัดทำรายการโครงหลังคาเหล็ก ประกอบการก่อสร้าง แล้วสร้างแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มในการวิเคราะห์ซึ่งสรุปเป็นผลดังนี้

ผลการวิจัยพบว่า วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณแต่ละประเภทที่มีความยาวมาตรฐาน 6 เมตร เพื่อให้ได้ความยาวและจำนวนตามความต้องการใช้งาน มีดังนี้ เหล็ก U $125 \times 65 \times 6 \times 8$ มิลลิเมตร ใช้เหล็กความยาวมาตรฐานจำนวน 6 ท่อน ตัดด้วยวิธีการ 5 วิธี มีเศษเหล็กรวมน้อยที่สุด 4.14 ม. เหล็ก C $100 \times 50 \times 20 \times 3.2$ มิลลิเมตร ใช้เหล็กความยาวมาตรฐานจำนวน 30 ท่อน ตัดด้วยวิธีการ 11 วิธี มีเศษเหล็กรวมน้อยที่สุด 17.77 เมตร เหล็ก □ $100 \times 50 \times 3.2$ มิลลิเมตร ใช้เหล็กความยาวมาตรฐานจำนวน 10 ท่อน ตัดด้วยวิธีการ 5 วิธี มีเศษเหล็กรวมน้อยที่สุด 1.93 เมตร เหล็ก □ $75 \times 38 \times 2.3$ มิลลิเมตร ใช้เหล็กความยาวมาตรฐานจำนวน 4 ท่อน ตัดด้วยวิธีการ 4 วิธี มีเศษเหล็กรวมน้อยที่สุด 4.26 เมตร เหล็ก □ $75 \times 75 \times 2.3$ มิลลิเมตร ใช้เหล็กความยาวมาตรฐานจำนวน 2 ท่อน ตัดด้วยวิธีการ 2 วิธี มีเศษเหล็กรวมน้อยที่สุด 5.08 เมตร เหล็ก □ $50 \times 50 \times 2.3$ มิลลิเมตร ใช้เหล็กความยาวมาตรฐานจำนวน 9 ท่อน ตัดด้วยวิธีการ 3 วิธี มีเศษเหล็กรวมน้อยที่สุด 1.80 เมตร

การวิจัย เรื่อง วิธีการตัดเหล็กรูปพรรณโครงสร้างหลังคาให้เสียเศษเหล็กน้อยที่สุด โดยแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม กรณีศึกษา บ้านหมอก เขาค้อ สำหรับแบบสามมิติ โครงสร้างหลังคาเหล็กแบบบ้านหมอก สร้างด้วยโปรแกรม SketchUp จำลองแบบได้เสมือนจริง ช่วยในการสื่อสารและช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าใจและมีประสิทธิภาพในการทำงานยิ่งขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ มงคล ฉันทไพศาล (2545) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้แบบจำลองเสมือนจริงในการเพิ่มความสามรถในการสื่อสารในช่วงการออกแบบ โดยมุ่งเน้นการศึกษาผลจากการใช้แบบจำลองเสมือนจริงในการออกแบบอาคารบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจากกรณีศึกษา "โครงการสร้างตึกครอบอาคารปฏิบัติการเจริญวิศวกรรม" ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการนำแบบจำลองเสมือนจริงมาประยุกต์ใช้ในช่วงการออกแบบสามารถช่วยให้ผู้ร่วมงานมองเห็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างก่อสร้างได้อย่างชัดเจน และช่วยในการสื่อสารระหว่างฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เนื่องจากช่วยให้ผู้ร่วมงานเข้าใจผลการออกแบบได้อย่างรวดเร็ว

สำหรับปัญหาในการหาวิธีการตัดวัสดุ 1 มิติ ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็ม เพื่อให้เกิดการสูญเสียเศษเหล็กน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ปฏิบัติในหน่วยงานก่อสร้าง มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้แนวทางการวิจัยทำนองเดียวกัน เช่น การวิจัยของจักรพันธ์ จ้อยเจริญ (2550) ทำการศึกษาเพื่อหาวิธีการตัดแบ่งเหล็กเส้นที่เหมาะสมสำหรับหลายโครงการ

ก่อสร้าง และงานวิจัยของ วีระยุทธ นิรันดร์วัฒนเดชา (2553) ที่ได้ศึกษาการพัฒนา รูปแบบการตัด เหล็กเส้นในโครงการก่อสร้างเพื่อลดปริมาณเศษเหล็ก

6. ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอเสนอแนะสิ่งที่อาจเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์แบบ จำลอง เชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อการวิจัยโอกาสต่อไป ดังนี้

6.1 ควรประยุกต์แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มกับวัสดุในงานก่อสร้างชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็นการตัดวัสดุ 1 มิติ เช่น เหล็กเส้น ท่อนไม้ ท่อนอลูมิเนียม เป็นต้น

6.2 ควรประยุกต์แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มกับปัญหาในงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น โรงงานผลิตมันกระดา

6.3 ควรประยุกต์แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มกับปัญหาการตัดวัสดุ 2 มิติ

7. เอกสารอ้างอิง

จักรพันธ์ จ้อยเจริญ. (2550). การศึกษาเพื่อหาวิธีการตัดแบ่งเหล็กเส้นที่เหมาะสมสำหรับหลาย โครงการก่อสร้าง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นพดล จอกแก้ว. (2546). ระบบรวมการจำลองขั้นตอนการทำงานแบบ 3 มิติ ระยะเวลาและ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยีภาพเสมือนจริง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ ดุษฎีบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มงคล ฉันทไพศาล. (2545). การศึกษาการใช้แบบจำลองเสมือนจริงในการเพิ่มความสามารถ ในการสื่อสารในช่วงการออกแบบ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีระยุทธ นิรันดร์วัฒนเดชา. (2553). การพัฒนา รูปแบบการตัดเหล็กเส้นในโครงการก่อสร้างเพื่อลด ปริมาณเศษเหล็ก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ศรายุทธ มาลัย. (2553). การประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นตรงสำหรับการควบคุมการตัดเหล็กรูปพรรณ, วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 21(3), กรกฎาคม-กันยายน 2558, หน้า 25-34.

ศรายุทธ มาลัย, หฤทัย ไทยสุชาติ และ ชัย ชัยนันดา. (2557). การวางแผนการตัดเหล็กเสริมและ เหล็กรูปพรรณด้วยโปรแกรมเชิงเส้นตรงแบบเลขจำนวนเต็มสำหรับก่อสร้างบ้านลอยน้ำ, การประชุมวิชาการระดับชาติ นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัด พิษณุโลก.

Al-Zubaidy S.S., Dawood S.Q. and Khalaf I.D. (2016). Optimal Utilization of Rebar Stock for Cutting Processes in Housing Project. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. vol. 3(5), pp. 189-193.

- Chinanuwatwong S., (2000). Reducing Waste from Cutting Reinforcing Steel in Construction Projects. **Kasetsart Journal (Natural Science)**. Vol. 34, pp. 526-535.
- Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems, **European Journal of Operations Research**, vol. 44(2), January 1990, pp. 145-159.
- Gilmore, P.C. and Gomory R.E. (1961). A linear programming approach to the cutting-stock problem. **Operations Research**, vol. 9(6), December 1961, pp. 849-859.
- Gilmore, P.C. and Gomory R.E. (1963). A linear programming approach to the cutting-stock problem-part II. **Operations Research**, vol. 11(6), December 1963, pp. 863-888.
- Kantorovich, L.V. (1960). Mathematical methods of organizing and planning production. **Management Science**, vol. 6(4), July 1960, pp. 366-422.
- Nozarian S., Jahan M.V. and Jalali M. (2013). An Imperialist Algorithm for 1-D Cutting Stock Problem. **International Journal of Information Science**. vol. 3(2), pp. 25-36.
- Salem, O., Shahin, A., and Khalifa, Y. (2007). Minimizing cutting wastes of reinforcement steel bars using genetic algorithms and integer programming models. **Journal of Construction Engineering and Management**. vol. 133(12), December 2007, pp. 982-992.
- Satoshi Kubota. (2012). Utilization of 3D Information on road construction projects in Japan, **Journal of Japan Society of Civil Engineers**, vol. 68(1), January 2012, pp. 43-48.