การจัดการนั่งร้านในโครงการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม

Optimizing Scaffolding in Construction Site by Applying Mixed-Integer Linear Programming

ศริณ พีระบูล[1,*] และ มาโนช โลหเตปานนท์[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
[2] สถาบันการขนส่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: 6370423821@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

นั่งร้านเป็นอุปกรณ์เพื่อใช้ประกอบเป็นโครงสร้างชั่วคราว ซึ่งมีความสำคัญในขั้นตอนการดำเนินงานก่อสร้าง ใช้สำหรับการทำงานเพื่อรองรับน้ำหนักผู้ปฏิบัติงาน, เครื่องมือ, วัสดุก่อสร้าง และใช้เป็นเป็นโครงค้ำยันเพื่อรองรับน้ำหนักแบบหล่อคอนกรีต ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างแทบจะทุกขั้นตอน การบริหารจัดการนั่งร้านที่ไม่ดีจะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบริหารจัดการงานก่อสร้างคือ สิ้นเปลืองงบประมาณและแรงงาน ในปัจจุบันการบริหารจัดการนั่งร้านในโครงการก่อสร้างมักจะใช้คนตัดสินใจ ส่งผลให้การบริหารจัดการอาจจะยังทำได้ไม่ดีพอหรือยังไม่ได้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และยังส่งผลให้สามารถเกิดข้อผิดพลาดจากตัวบุคคลได้ งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อเข้ามาช่วยแก้ปัญหาการเลือกขนาดนั่งร้านที่ใช้, การจัดการนั่งร้าน, การเช่านั่งร้านในโครงการก่อสร้าง และการขนส่งเข้าออกระหว่างสถานที่ก่อสร้างกับผู้ใช้เช่า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ควบคุมค่าใช้จ่ายและทำงานให้ได้ตามแผนงานที่วางเอาไว้ จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษามาใช้ทดสอบกับข้อมูลตัวอย่างพบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึงร้อยละ 27.9 และในการทดสอบทั้ง 5 ข้อมูลตัวอย่างพบว่าสามารถหาคำตอบที่มีค่าความต่างระหว่างค่าที่ดีที่สุดและคำตอบปัจจุบันไม่เกินร้อยละ 10 ภายในเวลา 30 นาที

คำสำคัญ: นั่งร้าน, การบริหารจัดการงานก่อสร้าง, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, แบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม

Abstract

Scaffolding is an essential temporary structure used in construction to support the weight of workers, tools, and materials. Additionally, it serves as a support frame for concrete formwork, playing a critical role in virtually every step of construction. However, poor management of scaffolding can have detrimental effects on overall construction management efficiency, including increased budget and labor expenditure. This can result in the quality of the final product. At present, the management of scaffolding in construction projects is primarily determined by human decision-making. This approach can lead to inadequate management, suboptimal outcomes, and the potential for human error. To address these challenges, this research aims to utilize mathematical modeling, specifically mixed-integer linear programming, to optimize the management of scaffolding in construction projects. This approach allows for the efficient selection of scaffold size, management of scaffold rental and transportation, which can result in a reduction of expenses and an increase in the efficiency of the work. Additionally, the application of mathematical modeling allows for the creation of a plan that can be followed to ensure that the project is completed on schedule and within budget. The research discovered that utilizing the mathematical model on sample data resulted in a reduction of costs by 27.9%. Additionally, the model was able to achieve an optimality gap of no more than 10% from the objective bound within a time frame of 30 minutes.

Keywords: Scaffolding, Construction management, Mathematical modeling, Mixed-integer linear programming

1. คำนำ

ปัจจุบันมีการแข่งขันในอุตสาหกรรมการก่อสร้างทำให้ผู้รับเหมางานก่อสร้างต้องหาวิธีควบคุมและลดต้นทุนในการก่อสร้างเพื่อให้สามารถประมูลราคาแข่งกับผู้รับเหมารายอื่นและทำผลกำไรออกมาได้ดี โดยที่การลดต้นทุนงานก่อสร้างสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการจัดวางแผนงาน การจัดการกำลังคน การคำนวนปริมาณวัสดุก่อสร้างให้แม่นยำ และการจัดการกับอุปกรณ์ที่ใช้ระหว่างดำเนินงานก่อสร้างให้เหมาะสมเกิดประสิทธิภาพ

สูงสุดเป็นต้น การควบคุมงบประมาณในโครงการก่อสร้างอยู่ในทุกขั้นตอนของงานก่อสร้างตั้งแต่ ประกวดราคา, วางแผนงาน, ควบคุมค่าใช้จ่าย รวมไปถึงการวิเคราะห์ทางการเงิน ผู้รับเหมาจำเป็นต้องควบคุมทุกขั้นตอนและบูรณาการขั้นตอนต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อควบคุมค่าใช้จ่ายอยู่ในงบประมาณที่ได้รับมา [1] การควบคุมค่าใช้จ่ายในโครงการสามารถพัฒนาโดยการวางแผนการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการก่อสร้าง, การวิเคราะห์คำนวณทางคณิตศาสตร์รวมไปถึงการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ถ้าการประมาณราคาไม่แม่นยำตั้งแต่ขั้นตอนการประกวดราคาแม้จะสามารถใช้งบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ยากที่โครงการจะประสพผลสำเร็จแต่ในทางกลับกันถ้างบประมาณไม่ได้ถูกบริหารจัดการที่ดีในช่วงการก่อสร้างก็จะทำให้เกิดปัญหาเช่นกัน [2] การบริหารจัดที่ไม่ดีส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำโดยเฉพาะงานก่อสร้างที่มีความซับซ้อนเช่น งานก่อสร้างที่เกี่ยวกับการขุดน้ำมันหรือก๊าซ และงานโครงสร้างพื้นฐาน [3]

นั่งร้านเป็นอุปกรณ์เพื่อประกอบเป็นโครงสร้างชั่วคราวซึ่งมีความสำคัญในขั้นตอนการดำเนินงานก่อสร้าง นั่งร้านใช้สำหรับการทำงานเพื่อรองรับน้ำหนักผู้ปฏิบัติงาน, วัสดุก่อสร้าง หรือใช้เป็นโครงค้ำยันเพื่อรองรับน้ำหนักแบบหล่อคอนกรีต ประโยชน์ใช้สอยอื่นๆของนั่งร้านคือป้องกันฝุ่นที่เกิดขึ้นขณะดำเนินงานก่อสร้างและการป้องกันการตกจากที่สูง นั่งร้านสามารถจัดเตรียมขึ้นได้ในพื้นที่งานก่อสร้างโดยการประกอบชิ้นส่วนย่อยของนั่งร้านเข้าด้วยกัน งานที่เกี่ยวข้องกับนั่งร้านแม้จะดูไม่สำคัญ แต่เมื่อดูงานที่เกี่ยวข้องกับนั่งร้านทั้งโครงการก่อสร้างจะพบได้ว่ามีส่วนเกี่ยวข้องในด้านของทรัพยากรที่ใช้อย่างมีนัยยะสำคัญ [4] จากการศึกษาในกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับนั่งร้านในโครงการก่อสร้างพบว่าในปัจจุบันสัดส่วนค่าใช้จ่ายโดยทั่วไปของนั่งร้านมากกว่าร้อยละ 12-15 และงานนั่งร้านยังเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลว่างานก่อสร้างเป็นไปตามแผนงานที่วางไว้เพราะงานนั่งร้านมักจะเชื่อมต่อกับงานที่สำคัญในเส้นทางวิกฤต [5] นั่งร้านมักจะอยู่ในงานโครงสร้างชั่วคราว อยู่ในค่าใช้จ่ายทางอ้อม ซึ่งงานชั่วคราวนั้นมีบทบาทสำคัญในด้านความปลอดภัยของโครงการก่อสร้าง การทำกำไร และการควบคุมคุณภาพงาน [6] การวางแผนงานและควบคุมค่าใช้จ่ายของงานนั่งร้านเป็นสิ่งจำเป็นแต่โดยทั่วไปแล้วงานโครงสร้างชั่วคราวมักจะไม่ได้ถูกควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด [7] นั่งร้านมักจะไม่ค่อยได้รับการสนใจ แต่จากการประมาณชั่วโมงการทำงาน พบว่างานที่เกี่ยวข้องกับนั่งร้านใช้ชั่วโมงการทำงานถึงร้อยละ 30-40 ของชั่วโมงการทำงานของโครงการก่อสร้างทั้งหมด นั่งร้านจึงเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน, ควบคุมค่าใช้จ่ายและทำงานให้ได้ตามแผนงานที่วางเอาไว้

2. แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นั่งร้านแบบโครง

นั่งร้านแบบโครง (frame scaffold) เป็นนั่งร้านโครงสร้างสำเร็จรูปประเภทหนึ่ง ในการประกอบนั่งร้านแบบโครงใช้ยึดโครงนั่งร้านเข้าด้วยกันด้วยตัวยึดโยงแบบกากบาท ใส่คานนั่งร้านหรือใช้ท่อเหล็กยึดกับโครงนั่งร้านด้วยแคลมป์ตาย แต่ละขานั่งร้านรองด้วยแผ่นรองเสาส่วนก้านบนเลือกใช้แผ่นรองเสารูปตัวยูหรือข้อต่อตามการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 1

2.1.1 ขาตั้งนั่งร้าน (Frame)

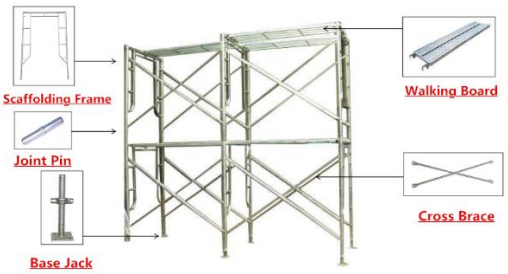
2.1.2 ตัวยึดโยงแบบกากบาท (Cross Braces)

2.1.3 คานนั่งร้านหรือแผ่นพื้นนั่งร้าน (Walking Board)

2.1.4 ข้อต่อ (Joint Pin)

2.1.5 แผ่นรองเสาปรับระดับ (Adjustable Jack base)

2.1.6 ฐานรองรับปรับระดับรูปตัวยู (Adjustable U-Head)

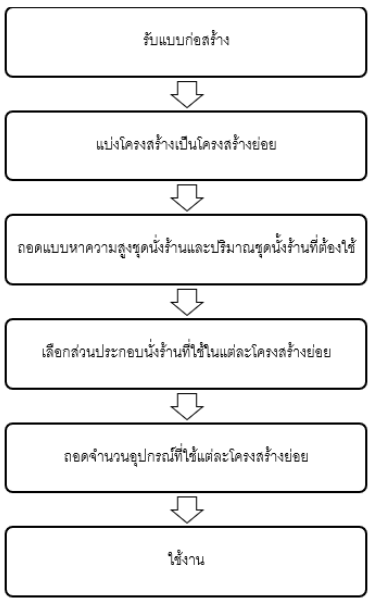


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของนั่งร้านแบบโครง

แผ่นรองเสาปรับระดับและฐานรองรับปรับระดับรูปตัวยูสามารถปรับระยะยื่นจากปลายเสาได้ไม่เกินร้อยละ 50 ยกเว้นมีเอกสารรับรองจากผู้ผลิต [8]

2.2 การจัดการนั่งร้านในไซต์งานก่อสร้าง

โดยทั่วไปนั่งร้านในโครงการก่อสร้างใช้สำหรับรองรับน้ำหนักผู้ปฏิบัติงานให้เข้าถึงพื้นที่ทำงาน ใช้เพื่อทำงานบนที่สูง และใช้ในการค้ำยันแบบคอนกรีต ในโครงการก่อสร้างการจัดการนั่งร้านจะเริ่มเมื่อผู้รับเหมาได้รับแบบก่อสร้างผู้รับเหมาจะนำแบบก่อสร้างมาแบ่งสิ่งก่อสร้างเป็นโครงสร้างย่อยๆเพื่อให้ง่ายต่อการวางแผนงาน โดยมักแบ่งตามการเทคอนกรีต แล้วดูว่าในแต่ละโครงสร้างย่อยต้องใช้อุปกรณ์ กำลังคน และวัสดุก่อสร้างจำนวนเท่าไหร่ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนการจัดการนั่งร้านในโครงการก่อสร้าง

การใช้นั่งร้านในพื้นที่ก่อสร้างจะเริ่มจากตั้งแต่เริ่มประกอบอุปกรณ์นั่งร้าน, ประกอบแบบ, เทคอนกรีต, ถอดแบบหล่อและค้ำยัน, และถอดอุปกรณ์นั่งร้านออก โดยการจะถอดแบบหล่อและค้ำยันออกได้ก็ต่อเมื่อคอนกรีตสามารถรับแรงอัดจากการรับน้ำหนักของคอนกรีตและน้ำหนักที่เกิดขึ้นระหว่างก่อสร้างโดยที่ระยะเวลาในการถอดแบบหล่อและค้ำยันจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆเช่น ส่วนผสมของคอนกรีตและชนิดของแบบหล่อของโครงสร้างเป็นต้น การที่จะถอดแบบคอนกรีตและค้ำยันจะต้องพิจารณาสองเงื่อนไขคือ กำลังอัดขั้นต่ำของคอนกรีต ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 หรือถ้าไม่มีผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตให้พิจารณาอายุขั้นต่ำของคอนกรีตตาม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 [9]

ตารางที่ 1 กำลังอัดขั้นต่ำของคอนกรีตสำหรับการถอดแบบหล่อและค้ำยัน

ชนิดของแบบหล่อของโครสร้าง	กำลังอัดขั้นต่ำของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
แบบหล่อด้านข้างของเสา, คาน, กำแพง และฐานราก	50
แบบหล่อท้องพื้น และคาน	140

ตารางที่ 2 อายุขั้นต่ำของคอนกรีตสำหรับการถอดแบบหล่อและค้ำยัน

ชนิดของแบบหล่อของโครสร้าง	อายุขั้นต่ำของคอนกรีต (วัน)
แบบหล่อด้านข้างของเสา, คาน, กำแพง และฐานราก	2
แบบหล่อท้องพื้น	14
แบบหล่อคาน	21

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการนั่งร้าน

2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายฟังชั่นวัตถุประสงค์

[5] ได้ศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการบริหารจัดการกิจกรรมที่เกี่ยวกับนั่งร้านโดยเป็นแบบจำลองหลายฟังชั่นวัตถุประสงค์โดยมีวัตถุประสงค์ที่สนใจ 3 อย่างคือ เวลาที่ใช้ ค่าใช้จ่าย และใช้ทรัพยากรเช่น แรงงานหรือเครน โดยที่มีตัวแปรในการตัดสินใจคือ x_j^m;y_{jt}^m; S_m และ C_m เมื่อ M เป็นเซตของพื้นที่ และ J เป็นเซตของชนิดของนั่งร้าน โดยที่ x_j^m y_{jt}^m เป็นตัวแปร binary ที่บ่งบอกว่าเลือกนั่งร้านชนิดใดในพื้นที่ไหนเวลาเท่าใด ตัวแปร S_m และ C_m เป็นตัวแปรบ่งบอกเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดการใช้นั่งร้านในพื้นที่นั้นๆ

ฟังชั่นวัตถุประสงค์แรกด้านเวลา ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$min\ F_t \quad = S_{m+1} \tag{1}$$

ฟังชั่นวัตถุประสงค์ที่สองด้านค่าใช่จ่าย ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$min\ F_c \quad = \sum_j \sum_m c_j^m x_j^m \tag{2}$$

นอกจากเวลาและค่าใช้จ่ายสิ่งที่ควรพิจารณาร่วมคือทรัพยากรแรงงานและเครื่องจักรโดยที่ จำนวนแรงงานควรใกล้เคียงตลอดระยะเวลาโครงการ ให้ r_{kt} เป็นทรัพยากร k ในระยะเวลา t ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$r_{kt} \quad = \sum_j \sum_m r_{jk}^m x_{jk}^m \tag{3}$$

จากการกำหนด r_{kt} ทำให้เราสามารถเขียนวัดความผันผวนในการทรัพยากรเป็นฟังชั่นวัตถุประสงค์ที่สามดังนี้ ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$min\ F_v \quad = \sum_k \sum_t (r_{kt} - \frac{1}{T} \sum_t r_{kt})^2 \tag{4}$$

โดยมีเงื่อนไขดังนี้

เงื่อนไขลำดับความสำคัญของงาน เนื่องจากบางกิจกรรมจะต้องทำกิจกรรมอื่นให้เสร็จก่อนจึงจะสามารถเริ่มดำเนินได้ ดังแสดงในสมการที่ (5) - (6)

$$S_j \geq C_i + 1, \forall (i,j) \in V \tag{5}$$

$$C_m \geq y_{jt}^m \cdot t, j = 1,..,J, m = 1,..,M, t = 1,..,T \tag{6}$$

เงื่อนไขทรัพยากร การประกอบและยกนั่งร้านต้องใช้กำลังคนและเครนยก กำหนดให้ต้องใช้ K ทรัพยากรในระยะเวลาโครงการ [0,T] และมีขอบเขตบนของทรัพยากรคือ U_k ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$r_{kt} \leq U_k, k = 1, \dots, K \tag{7}$$

เงื่อนไขการเลือกชนิดของนั่งร้านในพื้นที่ m ตลอดระยะเวลา t จะสามารถเลือกนั่งร้านได้ 1 ชนิดเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (8) – (11)

$$\sum_m x_j^m = 1, j = 1, \dots, J \tag{8}$$

$$\sum_t y_{jt}^m = x_j^m t_j^m, j = 1, \dots, J, m = 1, \dots, M \tag{9}$$

$$x_j^m \epsilon \{0,1\}, j = 1, \dots, J, m = 1, \dots, M \tag{10}$$

$$y_{jt}^m \epsilon \{0,1\}, j = 1,..,J, m = 1,..,M, t = 1,..,T \tag{11}$$

$$S_j \geq 0, C_j \geq 0, j = 1, \dots, J$$

โดยที่สมการที่ (8) กำหนดให้พื้นที่ m สามารถเลือกนั่งร้านได้เพียงหนึ่งชนิดเท่านั้น สมการที่ (9) จะบังคับให้ตลอดระยะเวลา t ใช้นั่งร้านชนิดเดิมและสมการที่ (10) - (11) เป็นสมการกำหนดให้ตัวแปร x และ y เป็น binary

ต่อมาใช้ *Tchebycheff decomposition* กำหนดให้มีการค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1, λ_2 และ λ_3 ขึ้นเพื่อเปลี่ยนแบบจำลองแบบหลายฟังชั่นวัตถุประสงค์เป็นแบบจำลองวัตถุประสงค์เดียว ดังแสดงในสมการที่ (12)

$$\min g^{te} = max\{\lambda_1 |F_t - F_t^*|, \lambda_2 |F_c - F_c^*|, \lambda_3 |F_v - F_v^*|\} \tag{12}$$

โดยที่ F_t^*, F_c^* และ F_v^* คือค่าน้อยที่สุดของ F_t, F_c และ F_v โดยมีเงื่อนไขตามสมการ (5) - (11) ตามลำดับ

2.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประยุกต์การวางแผนงานแบบกิจกรรมบนโหนด

[10] ได้ศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อบริหารงานนั่งร้านโดยที่มีวัตถุประสงค์ที่สนใจคือ เวลาที่ใช้ ค่าใช้จ่าย และความปลอดภัย โดยประยุกต์การวางแผนงานแบบกิจกรรมบนโหนด โดยกำหนด R_{ij} เป็นค่าความเสี่ยงโดยรวมของกิจกรรม โหนด i ถึง j ดังแสดงในสมการที่ (13)

$$R_{ij} = P_{ij} \times H_{ij} \times T_{ij} \times E_{ij} \quad (13)$$

โดยที่ P_{ij} คือค่าความเสี่ยงของกิจกรรม H_{ij} คือค่าเสี่ยงจากความผิดพลาดของมนุษย์ T_{ij} คือค่าความเสี่ยงของอุปกรณ์ และ E_{ij} คือค่าความเสี่ยงจากสิ่งแวดล้อม ทำให้สามารถคำนวนค่าความเสี่ยงโดยรวม $R(\sigma)$ ดังแสดงในสมการที่ (14)

$$R(\sigma) = \sum_{i=j}^{J} \sum_{j=1}^{a(i)} R_{ij}\, x_{ij} \quad (14)$$

โดยมีฟังชั่นวัตถุประสงค์ ดังแสดงในสมการที่ (15) - (17)

$$\text{Min } t(\sigma) = \sum_{i=j}^{J} \sum_{j=1}^{a(i)} t_{ij}\, x_{ij} \quad (15)$$

$$\text{Min } C(\sigma) = \sum_{i=j}^{J} \sum_{j=1}^{a(i)} v_{ij}\, x_{ij} \quad (16)$$

$$\text{Min } R(\sigma) = \sum_{i=j}^{J} \sum_{j=1}^{a(i)} R_{ij}\, x_{ij} \quad (17)$$

โดยมีเงื่อนไข ดังแสดงในสมการที่ (18) - (19)

$$\sum_{j=1}^{a(i)} x_{ij} = 1, \text{for all } i = 1, \dots, J \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{a(i)} t_{ij} x_{ij} + s_i \le s_k, \text{for all } k \in S(i), i = 1, .., J \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \text{for } i = 1, \dots, J, j = 1, \dots, a(i)$$

3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ไขปัญหา

3.1 แนวคิดการแก้ไขปัญหา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองเพื่อช่วยแก้ปัญหาการเลือกขนาด, การจัดการนั่งร้าน, การเช่านั่งร้านและขนย้ายอุปกรณ์นั่งร้านระหว่างไซต์ก่อสร้างและผู้ให้เช่า โดยขั้นตอนที่สนใจคือการเลือกขนาดของชุดนั่งร้านให้เหมาะสมกับแต่ละงานโครงสร้างย่อย เลือกจำนวนอุปกรณ์ที่จะใช้ในแต่ละช่วงระยะเวลาการคิดค่าใช้จ่าย รวมไปถึงการเลือกยานพาหนะในการขนส่งอุปกรณ์ระหว่างไซต์ก่อสร้างและผู้ให้เช่า ให้สอดคล้องกับแผนงานที่มีอยู่ โดยมีฟังชั่นวัตถุประสงค์คือค่าใช้จ่ายตลอดทั้งโครงการน้อยที่สุด ซึ่งสามารถคำนวนได้จากผลคูณของค่าใช้จ่ายในการจัดหาชิ้นส่วนของนั่งร้านต่อชิ้นต่อคาบระยะเวลาเช่า $cost_i^p$ คูณกับจำนวนชิ้นส่วนที่ใช้ในคาบระยะเวลาเช่า x_i^p รวมกับผลคูณค่าใช้จ่ายต่อรอบในการใช้ยานพาหนะ $cost_{su}^p$ คูณกับจำนวนยานพาหนะที่ใช้ขนอุปกรณ์ในคาบระยะเวลาเช่า v_{su}^p กำหนดให้แบ่งสิ่งก่อสร้างเป็นโครงสร้างย่อย m ดำเนินในคาบการวางแผน t โดยแต่ละโครงสร้างย่อยเป็นอิสระต่อกัน กล่าวคือแต่ละโครงสร้างย่อยสามารถเลือกรูปแบบนั่งร้านที่ใช้ได้แตกต่างกันแต่ในงานโครงสร้างย่อยเดียวกันสามารถเลือกใช้รูปแบบนั่งร้านได้เพียงแบบเดียวและถ้าโครงสร้างย่อยนั้นดำเนินงานใช้เวลาหลายคาบการวางแผนกำหนดให้ใช้รูปแบบนั่งร้านได้รูปแบบเดียวกันทุกคาบการวางแผน

จากการถอดแบบก่อสร้างเราจะได้ค่าความสูงที่ต้องการ $clearheight_m$ และจำนวนชุดนั่งร้านที่ต้องการ $demand_m^t$ ของแต่ละงานโครงสร้างย่อยโดยค่าความสูงจะนำไปคำนวณหารูปแบบการประกอบชุดนั่งร้าน j ที่สามารถประกอบให้สอดคล้องกับค่าความสูงที่ต้องการ จำนวนชุดนั่งร้านที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่การทำงานที่ต้องการ ไม่ขึ้นกับรูปแบบการประกอบชุดนั่งร้าน นำไปเป็นเงื่อนไขชุดนั่งร้านที่ใช้เพียงพอในแต่ละในงานโครงสร้างย่อยเมื่อได้รูปแบบการประกอบชุดนั่งร้านที่เป็นไปได้ทั้งหมด ต่อมาสร้างตัวแปรตัดสินใจขึ้นมาสองตัวคือ y_{jm}^t เป็นตัวแปร binary เพื่อใช้เลือกรูปแบบการประกอบชุดนั่งร้านโดยจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง เมื่อเลือกใช้รูปแบบนั้นๆค่า y_{jm}^t ของรูปแบบอื่นๆจะเท่ากับศูนย์ ใช้คู่กับตัวแปร z_{jm}^t เป็นจำนวนชุดนั่งร้านที่ใช้ โดยที่ z_{jm}^t จะมีค่าได้ก็ต่อเมื่อ y_{jm}^t ที่คู่กันจะต้องมีค่าเป็นหนึ่งหลังจากได้รูปแบบการประกอบชุดนั่งร้านในแต่ละงานย่อยหรือ y_{jm}^t แล้วจะถอดจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละชุดนั่งร้านได้จากการเอาค่าจำนวนชิ้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบนั่งร้านหนึ่งชุด $component_{ij}$ คูณกับจำนวนชุดนั่งร้านหรือ z_{jm}^t กำหนดให้ w_i^t เป็นจำนวนชิ้นส่วนนั่งร้าน i ที่ใช้ในคาบวางแผน t สามารถหาได้จาก w_i^t ต้องมากกว่า ผลคูณของจำนวนชุดนั่งร้านหรือ z_{jm}^t คูณกับจำนวนชิ้นที่ใช้ในการประกอบนั่งร้านหนึ่งชุด $component_{ij}$ การจัดหานั่งร้านในการศึกษานี้กำหนดเป็นการจัดหาจากลักษณะการเช่าจากผู้ให้บริการเช่าอุปกรณ์นั่งร้าน คำนวนได้จากผลคูณของค่าใช้จ่ายในการจัดหาชิ้นส่วนของนั่งร้านต่อชิ้นต่อคาบระยะเวลาเช่า $cost_i^p$ คูณกับจำนวนชิ้นส่วนที่ใช้ในคาบระยะเวลาเช่า x_i^p ซึ่งจำนวนชิ้นส่วนที่เช่า x_i^p จะต้องมากกว่าจำนวนชิ้นในคาบย่อยหรือคาบวางแผน w_i^t โดยการศึกษานี้กำหนดให้จำนวนนั่งร้านที่ให้เช่ามีไม่จำกัด ในส่วนของค่าใช้จ่ายในการขนย้ายอุปกรณ์นั่งร้านคำนวนจากผลคูณค่าใช้จ่ายต่อรอบในการใช้ยานพาหนะ $cost_{su}^p$ คูณกับจำนวนยานพาหนะที่ใช้ขนอุปกรณ์ในคาบระยะเวลาเช่า v_{su}^p โดยที่น้ำหนักรวมที่สามารถบรรทุกได้ของยานพาหนะต้องมากการผลนวมของน้ำหนักอุปกรณ์ที่ต้องการขนส่งระหว่างไซต์ก่อสร้างและผู้ให้เช่า

3.2 เครื่องหมายและสัญลักษณ์

3.2.1 เซ็ต

I เป็นเซตของชนิดชิ้นส่วนของนั่งร้าน, ใช้ดัชนี i
J เป็นเซตของรูปแบบการประกอบชุดนั่งร้าน, ใช้ดัชนี j
M เป็นเซตของงานโครงสร้างย่อย, ใช้ดัชนี m
T เป็นเซตของคาบการวางแผนการใช้นั่งร้าน, ใช้ดัชนี t
S เป็นเซตของชนิดยานพาหนะ, ใช้ดัชนี s
U เป็นเซตของทิศทางการขนอุปกรณ์เข้าหรือออก, ใช้ดัชนี u
P เป็นเซตของคาบการคิดค่าใช้จ่าย, ใช้ดัชนี p โดยที่ $T \subseteq P$

3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์

$bigM$	*เป็นจำนวนขนาดใหญ่*
$carrycapacity_s$	น้ำหนักที่สามารถบรรทุกได้ของยานพาหนะ $s \in S$
$clearheight_m$	ค่าความสูงที่ต้องการในงานโครงสร้างย่อย $m \in M$
$component_{ij}$	เป็นจำนวนชิ้นของชิ้นส่วนนั่งร้าน $i \in I$ ในการประกอบชุดนั่งร้าน $j \in J$
$cost^p_{su}$	เป็นค่าใช้จ่ายต่อรอบในการใช้ยานพาหนะ $s \in S$ ทิศทางการขนอุปกรณ์ $u \in U$ ในระยะเวลา $p \in P$
$cost^p_i$	เป็นค่าใช้จ่ายต่อชิ้นในการจัดหาชิ้นส่วนของนั่งร้าน $i \in I$ ในระยะเวลา $p \in P$
$demand^t_m$	*เป็นจำนวนชุดนั่งร้านที่ต้องการในงานโครงสร้างย่อย* $m \in M$ *ในระยะเวลา* $t \in T$
$weight_i$	น้ำหนักของชิ้นส่วนของนั่งร้าน $i \in I$

3.2.3 ตัวแปรการตัดสินใจ

$v^p_{us} \in \mathbb{Z}$	*โดยที่* v^p_{su} *เป็นจำนวนยานพาหนะ* $s \in S$ *ทิศทางการขนอุปกรณ์* $u \in U$ *ที่เลือกใช้ในระยะเวลา* $p \in P$
$w^t_i \geq 0$	*โดยที่* w^t_i *เป็นจำนวนชิ้นส่วนนั่งร้าน* $i \in I$ *ใช้ในระยะเวลา* $t \in T$
$x^p_i \geq 0$	*โดยที่* x^p_i *เป็นจำนวนชิ้นส่วนนั่งร้าน* $i \in I$ *ที่เลือกใช้ในระยะเวลา* $p \in P$
$y^t_{jm} \in \{0,1\}$	*โดยที่* y^t_{jm} *เป็นรูปแบบส่วนประประกอบของชุดนั่งร้าน* $j \in J$ *ที่เลือกใช้ในงานโครงสร้างย่อย* $m \in M$ *ในระยะเวลา* $t \in T$
$z^t_{jm} \geq 0$	*โดยที่* z^t_{jm} *เป็นจำนวนชุดนั่งร้าน* $j \in J$ *เลือกใช้ในงานโครงสร้างย่อย* $m \in M$ *ในระยะเวลา* $t \in T$

3.2.4 ฟังชั่นวัตถุประสงค์

ฟังชั่นวัตถุประสงค์สามารถคำนวนได้จากผลรวมค่าขนย้ายอุปกรณ์และค่าเช่าอุปกรณ์ ดังแสดงในสมการที่ (20)

$$\min F_c = \sum_{p\in P}\sum_{s\in S}\sum_{u\in U} cost^p_{su} v^p_{su} + \sum_{p\in P}\sum_{i\in I} cost^p_i x^p_i \quad (20)$$

3.2.5 เงื่อนไข

1) เงื่อนไขจำนวนชุดนั่งร้านที่ใช้เพียงพอในแต่ละในงานโครงสร้างย่อย ดังแสดงในสมการที่ (21)

$$\sum_{t\in T}\sum_{j\in J} z^t_{jm} \geq demand^t_m \quad ;\forall\, m \in M \quad (21)$$

2) เงื่อนไขในแต่ละงานโครงสร้างย่อยสามารถเลือกรูปแบบการประกอบชุดนั่งร้านได้รูปแบบเดียว ดังแสดงในสมการที่ (22) - (23)

$$\sum_{j\in J} y^t_{jm} = 1 \;;\forall\, t \in T, \forall\, m \in M \quad (22)$$

$$z^t_{jm} \leq (bigM) y^t_{jm} \;;\forall\, t \in T, \forall\, j \in J, \forall\, m \in M \quad (23)$$

3) เงื่อนไขความต่อเนื่องของงานในมิติของเวลา ตลอดช่วงเวลาของงานโครงสร้างย่อยสามารถเลือกรูปแบบการประกอบชุดนั่งร้านได้รูปแบบเดียว ดังแสดงในสมการที่ (24)

$$y^t_{jm} = y^{t+1}_{jm} \;;\forall\, t \in T\backslash\{t_T\}, \forall\, j \in J\,, \forall\, m \in M \quad (24)$$

4) เงื่อนไขจำนวนชิ้นส่วนนั่งร้านในแต่ละเวลามากกว่าผลรวมของจำนวนชิ้นส่วนของชุดนั่งร้านในแต่ละงานย่อย ดังแสดงในสมการที่ (25)

$$w^t_i \geq \sum_{j\in J}\sum_{m\in M} component_{ij} z^t_{jm} \;;\forall\, t \in T; \forall\, i \in I \quad (25)$$

5) เงื่อนไขจำนวนชิ้นส่วนนั่งร้านในคาบระยะเวลาในการคิดค่าใช้จ่ายมากกว่าจำนวนชิ้นส่วนนั่งร้านในคาบการวางแผนใช้นั่งร้านในงานย่อย ดังแสดงในสมการที่ (26)

$$x^p_i \geq w^t_i \quad ;\forall\, t \in P^T \quad (26)$$

6) เงื่อนไขจำนวนในการขนย้ายชิ้นส่วนต้องสอดคล้องต่อเวลาต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ (27) - (29)

$$transport^p_{iu} \geq x^p_i;\ for\ p = 1;\ \forall\, i \in I \quad (27)$$

$$x^p_i \geq x^{p-1}_i + transport^p_{iu};\ for\ \ p = 2, \ldots,\ \ p - 1; \forall\, i \in I \quad (28)$$

$$transport^p_{iu} \geq x^{p-1}_i;\ for\ p = p;\ \forall\, i \in I \quad (29)$$

โดยกำหนดให้ตัวแปร $transport^p_{iu}$ เป็นตัวแปรที่ไว้เก็บค่าจำนวนชิ้นอุปกรณ์นั่งร้านที่ต้องการขนย้ายในช่วงเวลาต่างๆ โดยที่คาบระยะเวลาการเช่าแรกมีเพียงการขนอุปกรณ์เข้าไซต์ก่อสร้าง ดังที่แสดงในสมการ (27) และคาบระยะเวลาการเช่าสุดท้ายมีเพียงการขนอุปกรณ์ออกจากไซต์ก่อสร้าง ดังที่แสดงในสมการ (29)

7) เงื่อนไขการใช้ยานพาหนะขนย้ายชิ้นส่วนระหว่างไซต์ก่อสร้างและผู้ให้เช่า โดยที่น้ำหนักรวมของยาพาหนะที่ใช้ขนย้ายต้องมากกว่าน้ำรวมของแต่ละชิ้นส่วนอุปกรณ์นั้งร้านในเวลาต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ (30)

$$\sum_{s\in S} carrycapacity_s\, v^p_{su} \geq \sum_{i\in I} weight_i\, transport^p_{iu};\ for\ p = 1, \ldots, p; \forall\, u \in U \quad (30)$$

4. ผลการศึกษา

4.1 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษานี้ผู้ศึกษาได้เก็บข้อมูลอาคารสูงจำนวน 5 อาคารเพื่อนำมาทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ทดลอง

ชุดข้อมูล	ชนิดของอาคาร	จำนวนโครงสร้างย่อยที่ใช้นั่งร้าน
A	โรงแรม	33
B	อาคารจอดรถ	25
C	คอนโดมิเนียม	46
D	คอนโดมิเนียม	36
E	คอนโดมิเนียม	35

4.2 การทดลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษานี้จะใช้โปรแกรมภาษา Python แพคเกจเสริม Gurobi ซึ่งเป็นแพคเกจที่ช่วยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ การทดลองจะหยุดต่อเมื่อค่า optimality gap ในขณะนั้นน้อยกว่าร้อยละ 0.01 หรือใช้เวลามากกว่า 1800 วินาที

โดยการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือ complication test และ performance test โดยที่ทั้งสองการทดลองจะปรับคาบระยะเวลาการวางแผนการใช้นั่งร้านในงานย่อย t, คาบระยะเวลาในการคิดค่าใช้จ่าย p และปรับระยะยืดของฐานรองรับปรับระดับรูปตัวยูและแผ่นรองเสาปรับระดับโดยกำหนดค่า U+J เป็นระยะยืดที่ยอมให้ได้ของแต่ละชิ้นส่วน

ตัวอย่างชื่อการทดลอง A030940 หมายถึง หมายถึงข้อมูลชุด A, t=3, p =9 และระยะยืด = 40

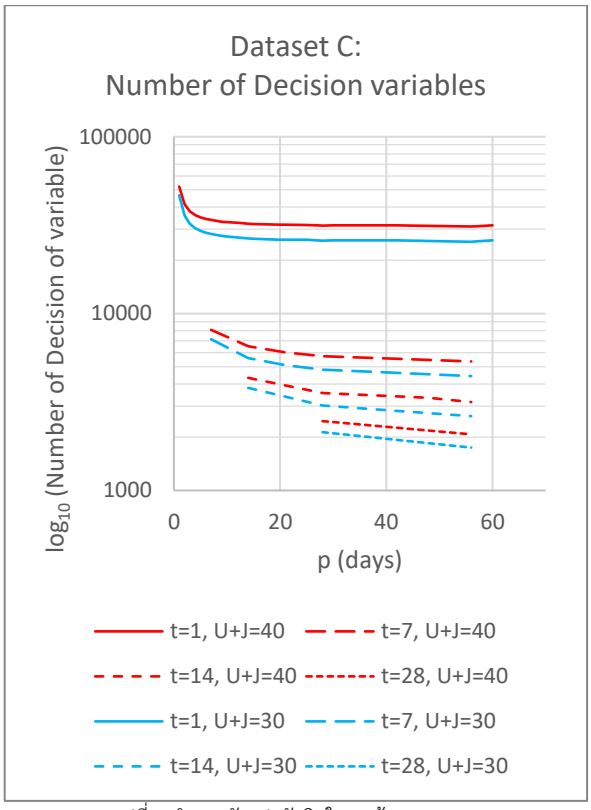
4.2.1 complication test โดยใช้ข้อมูลชุด A - E เพื่อศึกษาค่าฟังชั่นวัตุประสงค์ค่าใช้จ่ายตลอดทั้งโครงการ ลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เช่น เวลาที่ใช้แก้ปัญหาและ optimality gap เป็นต้น

4.2.2 performance test โดยใช้ข้อมูลชุด A เพื่อเปรียบเทียบความสามารถของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการตัดสินใจของมนุษย์ที่เคยเกิดขึ้นจริงใช้ในการก่อสร้างอาคาร ข้อมูลชุด A ลอกอริทึมเพื่อแสดงให้เห็นว่า การปรับจำนวนวันในคาบ t หรือ p ในช่วงที่มีค่าน้อยส่งผลมากกว่าการปรับในช่วงที่มีค่ามาก

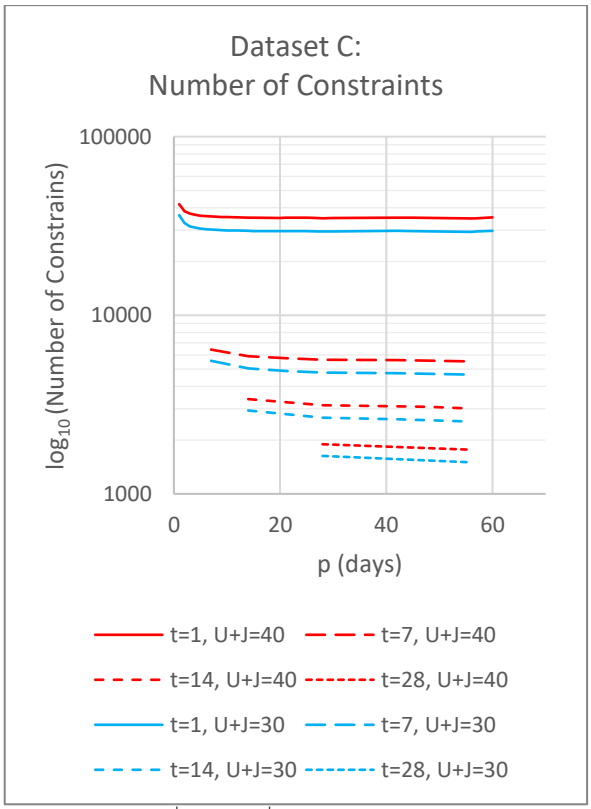
4.3 ผลการทดลอง

4.3.1 ขนาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 สังเกตได้ว่าเมื่อปรับจำนวนวันในคาบ t หรือ p น้อยลงทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีจำนวนคาบมากขึ้น ส่งผลให้จำนวนตัวแปรตัดสินใจและจำนวนเงื่อนไขมีแนวโน้มที่จะมากขึ้น เมื่อปรับค่าระยะยืดของฐานรองรับรูปตัวยูและแผ่นรองเสามากขึ้นทำให้มีรูปแบบการประกอบชุดนั่งร้าน j มากขึ้น ส่งผลให้จำนวนตัวแปรตัดสินใจและจำนวนเงื่อนไขมีจำนวนมากขึ้น โดยรูปที่ 3 และรูปที่ 4 เลือกใช้มาตราส่วน

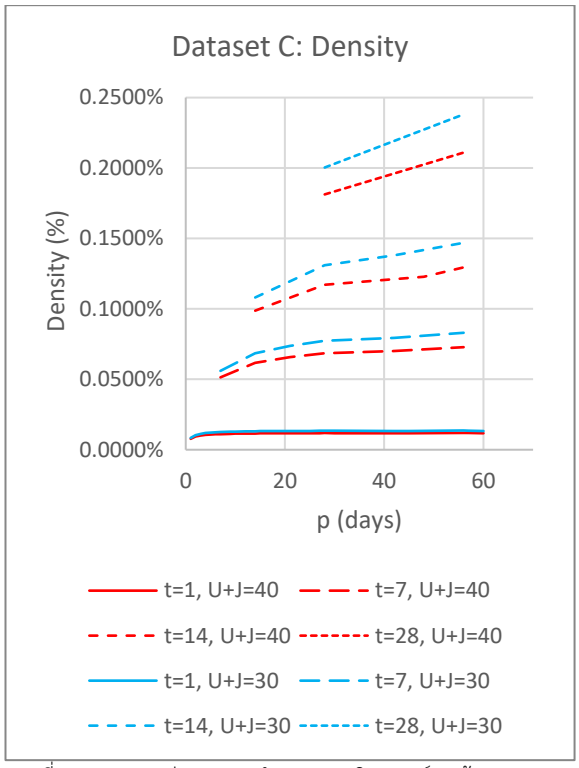


รูปที่ 3 จำนวนตัวแปรตัดสินใจ ชุดข้อมูล C



รูปที่ 4 จำนวนเงื่อนไข ชุดข้อมูล C

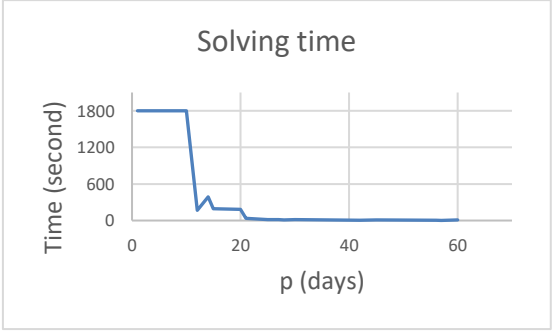
จากรูปที่ 5 สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีขนาดใหญ่ขึ้นความหนาแน่นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลดลง



รูปที่ 5 ความหนาแน่นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ชุดข้อมูล C

4.3.2 เวลาที่ใช้แก้ปัญหา

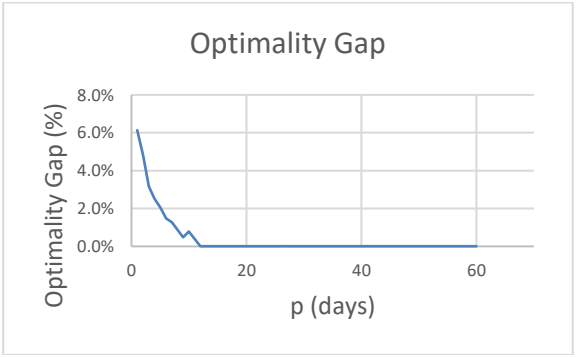
การศึกษานี้กำหนดว่า การทดลองจะหยุดต่อเมื่อค่า optimality gap ในขณะนั้นน้อยกว่าร้อยละ 0.01 หรือใช้เวลามากกว่า 1800 วินาที เมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีขนาดใช้ใหญ่ขึ้นส่งผลให้เวลาในการแก้ไขปัญหามีแนวโน้มนานมากขึ้น ตามรูปที่ 6 ทั้งนี้พบว่านอกจากขนาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีผลต่อเวลาที่ใช้แก้ปัญหาแล้ว ข้อมูลแต่ละชุดจะมีลักษณะของปัญหาที่แตกต่างกัน เช่นความต่างของความสูงในแต่ละงานย่อย อาคารจอดรถจะมีขนาดความสูงของโครงสร้างย่อยที่เท่ากัน แต่โรงแรมกับคอนโดมิเนียมมักจะมีความสูงของงานโครงสร้างย่อยที่ต่างกัน เพราะออกแบบให้ใช้งานแตกต่างกันเช่น ชั้นจอดรถ ชั้นห้องพักอาศัย ชั้นส่วนกลาง เป็นต้น



รูปที่ 6 เวลาที่ใช้แก้ไขปัญหา ชุดข้อมูล C t=1 U+J=40

4.3.3 Optimal gap

Optimality gap คือค่าความต่างระหว่างค่าคำตอบที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุดของอัลกอริทึมกับค่าคำตอบที่มีจากการแก้ปัญหาจริง เมื่อแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีขนาดใหญ่หรือซับซ้อนจะมีช่วงของค่า Optimality gap มากขึ้น ปัญหาที่ยากกว่าจะใช้เวลามากกว่าในการทำให้ค่า Optimality gap เท่ากับปัญหาที่ง่ายกว่า หรือในเวลาที่เท่ากันปัญหาที่ยากกว่าจะมี Optimality gap ที่มากกว่าปัญหาที่ง่ายกว่า ดังแสดงรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าคาบระยะเวลาในการคิดค่าใช้จ่าย p มากขึ้นทำให้จำนวนคาบน้อยลงส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีขนาดเล็กลง ทำให้ค่า Optimality gap มีแนวโน้มลดลงเมื่อกำหนดให้ใช้เวลาการแก้ปัญหาไม่เกิน 1800 วินาทีเท่ากัน



รูปที่ 7 Optimality gap ชุดข้อมูล C t=1 U+J=40

4.3.4 ค่าฟังชั่นวัตถุประสงค์

ค่าฟังชั่นวัตุประสงค์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ค่าใช้จ่ายทั้งโครงการซึ่งประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการเช่าอุปกรณ์นั่งร้านรวมกับค่าใช้จ่ายในการขนย้ายอุปกรณ์นั่งร้านระหว่างไซต์ก่อสร้างและผู้ให้เช่านั่งร้าน จากการศึกษาพบว่าข้อมูลชุด A – E มีแนวโน้มและพฤติกรรมเหมือนกัน โดยจากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ดังนี้ คาบระยะเวลาการวางแผนการใช้นั่งร้านในงานย่อย t, คาบระยะเวลาในการคิดค่าใช้จ่าย p และปรับระยะยืดของฐานรองรับปรับระดับรูปตัวยูและแผ่นรองเสาปรับระดับ จะได้ค่าฟังชั่นวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป โดยที่เมื่อปรับค่า t หรือ p น้อยลงจะส่งผลให้ค่าฟังชั่นวัตถุประสงค์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อเราปรับจำนวนวันในคาบให้น้อยลงทำให้เราแบ่งคาบระยะเวลาได้ถี่มากขึ้น ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางเลือกในการตัดสินใจมากขึ้น แต่บางครั้งคาบระยะเวลาที่น้อยกว่าอาจจะเกิดเหตุบังเอิญประจวบกันทำให้ค่าฟังชั่นวัตถุประสงค์มากกว่าคาบระยะเวลาที่มากกว่าได้ เมื่อปรับค่าระยะยืด จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับระยะยืดที่ยอมให้ได้มากขึ้นทำให้ค่าฟังชั่นวัตถุประสงค์ลดลง เนื่องจากเมื่อปรับระยะยืดให้มากขึ้นทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีรูปแบบการประกอบชุดนั่งร้าน j ในแต่ละความสูงมากขึ้น ส่งผลให้ทางเลือกในการเลือกใช้อุปกรณ์มากขึ้น ค่าฟังชั่นวัตถุประสงค์จึงลดลง

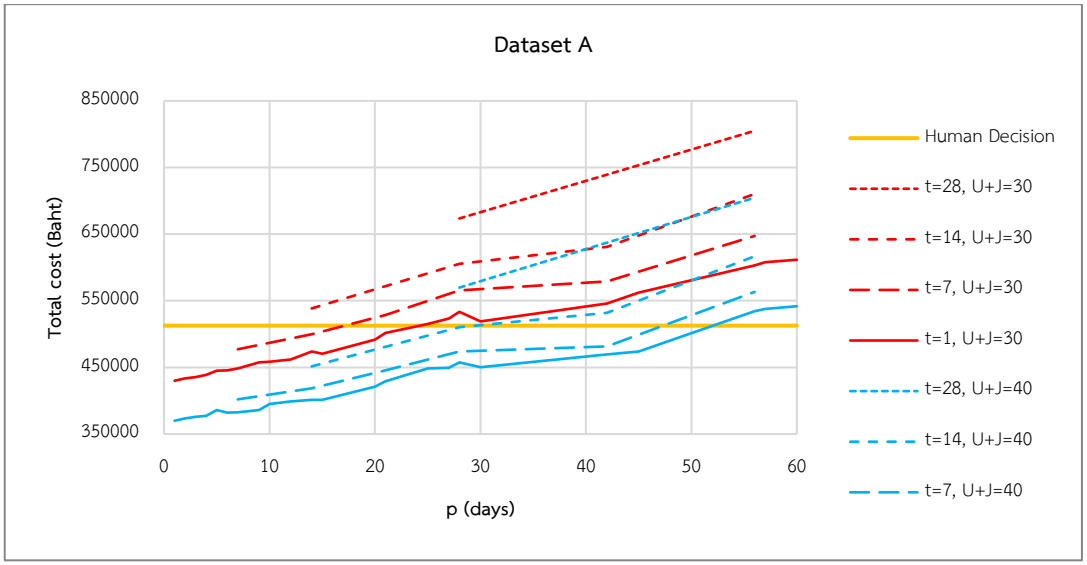
จากรูปที่ 9 เมื่อแยกค่าใช้จ่ายทั้งโครงการออกเป็นสองส่วน คือ ค่าใช้จ่ายในการเช่าอุปกรณ์นั่งร้านและค่าใช้จ่ายในการขนย้ายอุปกรณ์

นั่งร้านระหว่างไซต์ก่อสร้างและผู้ให้เช่านั่งร้าน เมื่อเมื่อปรับค่า t หรือ p ให้น้อยลงทำให้เรามีจำนวนคาบถี่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการเช่าอุปกรณ์นั่งร้านมีแนวโน้มน้อยลงเนื่องจากสามารถเรียกใช้อุปกรณ์นั่งร้านที่ต้องการใช้หรือส่งอุปกรณ์นั่งร้านที่ใช้เสร็จเรียบร้อยแล้วได้ถี่มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่เช่าโดยที่ไม่ได้ใช้งานเนื่องจากรอให้ถึงรอบการขนย้ายต่อไปน้อยลง แต่ค่าใช้จ่ายในการขนย้ายอุปกรณ์นั่งร้านมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อ คาบระยะเวลา t และ p น้อยลง เนื่องจากมีการขนส่งอุปกรณ์นั่งร้านที่ถี่มากขึ้น เมื่อปรับค่าระยะยืดทั้งค่าใช้จ่ายในการเช่าอุปกรณ์นั่งร้านและค่าใช้จ่ายในการขนย้ายอุปกรณ์นั่งร้านระหว่างไซต์ก่อสร้างและผู้ให้เช่านั่งร้านมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากรูปแบบการประกอบชุดนั่งร้าน j ในแต่ละความสูงมากขึ้น ส่งผลให้สามารถใช้นั่งร้านที่มีอยู่ประกอบเป็นความสูงต่างๆได้มากขึ้น ทำให้เลือกอุปกรณ์มาประกอบได้เหมาะสมขึ้นและทำให้ลดจำนวนรอบที่ต้องขนย้ายอุปกรณ์ลง

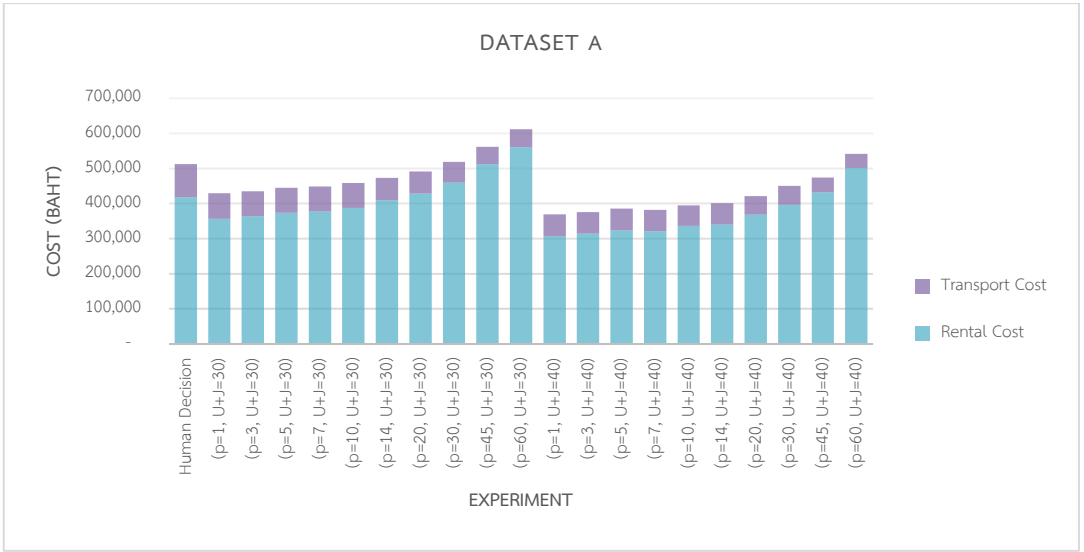
เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการตัดสินใจของมนุษย์ที่เกิดขึ้นจริงจะเห็นได้ว่าการทดลอง A010140 สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายรวมไปได้ 142,802 บาท คิดเป็นร้อยละ 27.9 จากค่าใช้จ่ายรวมที่เคยใช้จริง แบ่งเป็น ค่าเช่า 110,802 บาท คิดเป็นร้อยละ 26.5 จากค่าเช่าที่เคยใช้จริง และค่าขนส่ง 32,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 33.9 จากค่าขนส่งที่เคยใช้จริง ดังที่แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบข้อมูลที่เคยใช้จริงกับการทดลอง **A010140**

การทดลอง	ค่าเช่า (บาท)	ค่าขนส่ง (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวม (บาท)
การตัดสินใจของมนุษย์	418,169	94,500	512,669
A010140	307,367	62,500	369,867
ความแตกต่าง	110,802	32,000	142,802
ร้อยละความแตกต่าง	26.5	33.9	27.9



รูปที่ 8 ผลการทดลอง ชุดข้อมูล A



รูปที่ 9 สัดส่วนค่าใช้จ่าย ชุดข้อมูล A t=1

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้นำแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมมาเป็นเครื่องมือเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาการจัดการนั่งร้านในโครงการก่อสร้าง โดยกำหนดฟังชั่นค่าวัตถุประสงค์คือค่าใช้จ่ายรวมของทั้งโครงการซึ่งสามารถคำนวนได้จากค่าเช่าอุปกรณ์และค่าขนย้ายอุปกรณ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะช่วยเลือกขนาดอุปกรณ์นั่งร้านที่เหมาะสมเพื่อใช้งานในแต่ละงานโครงสร้างย่อย และวางแผนการวนใช้อุปกรณ์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และยังเลือกขนาดยานพาหนะและเวลาที่จะใช้ขนย้ายอุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อลดค่าใช้จ่าย จากการทดลองเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการตัดสินใจของมนุษย์พบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึงร้อยละ 27.9 นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ยังสามารถให้คำตอบที่มีค่าความต่างระหว่างค่าที่ดีที่สุดและคำตอบปัจจุบันไม่เกินร้อยละ 10 ภายในระยะเวลา 30 นาที จากการทดลองปรับตัวแปร คาบระยะเวลาการวางแผนการใช้นั่งร้านในงานย่อยและคาบระยะเวลาในการคิดค่าใช้จ่าย พบว่าเมื่อจำนวนวันในคาบน้อยลงจะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายได้แต่จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลาในการแก้ปัญหานานขึ้น จากการทดลองปรับระยะยืดของฐานรองรับปรับระดับรูปตัวยูและแผ่นรองเสาปรับระดับพบว่าเมื่อปรับให้ระยะยืดที่ยอมให้ได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายน้อยลง

การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในมิติต่างๆ ในด้านเวลาที่ใช้แก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผู้ศึกษาคิดว่าเมื่อนำไปใช้กับโครงการที่มีจำนวนของข้อมูลมีจำนวนโครงสร้างย่อยไม่มากกว่า 50 รายการ การกำหนดค่าคาบระยะเวลาการวางแผนการใช้นั่งร้านในงานย่อยและคาบระยะเวลาในการคิดค่าใช้จ่ายให้เท่ากับหนึ่ง โดยมีเวลาการแก้ไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 30 นาทีมีความเหมาะสมดีแล้วในเบื้องต้น แต่ถ้านำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้และพบว่า optimality gap มีค่ามากสามารถปรับเพิ่มเวลาที่ใช้แก้ไขปัญหาได้ตามความเหมาะสม จากการทดลองปรับระยะยืดของฐานรองรับปรับระดับรูปตัวยูและแผ่นรองเสาปรับระดับพบว่าไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้แก้ไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างมีนัยยะสำคัญ โดยที่ระยะยืดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอุปกรณ์ เพราะฉะนั้นการเลือกอุปกรณ์ก็เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญด้วย

ค่าใช้จ่ายที่กำหนดขึ้นในการศึกษานี้อาจแตกต่างกับค่าใช้จ่ายของผู้ให้เช่าอุปกรณ์หรือผู้ให้บริการขนส่งรายต่างๆ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ส่งผลให้ได้คำตอบที่แตกต่างออกไปรวมถึงอาจจะมีแนวโน้มหรือพฤติกรรมของแบบจำลองที่แตกต่างออกไป

การจัดการนั่งร้านของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างอาจจะมีการจัดการที่แตกต่างกับไปตามผู้รับเหมาหรือผู้ที่ได้รับมอบหมายให้จัดการนั่งร้าน เช่นผู้รับเหมาอาจจะมีอุปกรณ์นั่งร้านบางส่วนเป็นของตัวเอง มีการคิดราคาค่าเช่าที่ต่างออกไปหรือต้องการที่จะใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ก่อน หรือจัดหาอุปกรณ์นั่งร้านจากหลายผู้ให้บริการเช่าอุปกรณ์ รวมถึงข้อกำหนดตาต่างๆที่ไม่เหมือนกัน เช่นบางไซต์งานไม่สามารถทำงานวันอาทิตย์ได้หรือมีลักษณะบางอย่างเช่น ทุกๆวันจันทร์แรกของเดือนจะมีการขนเหล็กเส้นเข้าไซต์งาน ทำให้ไม่สามารถขนย้ายอุปกรณ์นั่งร้านได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.มาโนช โลหเตปานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษา ช่วยให้ความรู้และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์ และ รศ.ดร.สมชาย ปฐมศิริ ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะ และประเมินผลส่งผลให้งานวิจัยชิ้นนี้จึงสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีและมีคุณภาพ ผู้เขียนน้อมรับทุกความเห็นในรายงานเพื่อนำไปปรับปรุง

เอกสารอ้างอิง

[1] Abeselom Abraham (2008) “Improving Cost Management Practices of National Contractors; Focused on Building Construction Project”, Addis Ababa University, Civil Engineering Department

[2] Yismaletet. al., Vol.5 (Iss.1): January,2018 A CRITICAL LITERATURE REVIEW ON IMPROVING PROJECT COST MANAGEMENT PRACTICE AND PROFITABILITY OF DOMESTIC CONTRACTORS

[3] Wang, X., Yung, P., Lue, H., and Truijens, M. (2014). “An innovative method for project control in LNG project through 5D CAD: A case study.” Autom. Constr., 45, 126–135.

[4] Kumar, C., AbouRizk, S. M., Mohamed, Y., Taghaddos, H., and Hermann, U. (2013). “Estimation and planning tool for industrial construction scaffolding.” Proc., 30th ISARC, Curran Associates, Red Hook, NY, 634–642

[5] Lei Hou; Chuanxin Zhao; Changzhi Wu; Sungkon Moon; and Xiangyu Wang (2016) Discrete Firefly Algorithm for Scaffolding Construction Scheduling

[6] Illingworth 1987 Illingworth, J. (1987). Temporary Works Their Role in Construction. London: Thomas Telford.

[7] Carr, R. I. (1989). Cost-Estimating Principles. ASCE, 545-551.

[8] มาตรฐาน มยผ. 1571-62 : มาตรฐานการติดตั้งและการตรวจสอบโครงสร้างนั่งร้าน, สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร, กรมโยธาธิการและผังเมือง

[9] มาตรฐาน E.I.T.Standard 1014-46 : ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต, คนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

[10] Lei Hou, Changzhi Wu, Xiangyu Wang and Jun Wang (2014) “A Framework Design for Optimizing Scaffolding Erection by Applying Mathematical Models and Virtual Simulation”