A Comparative Study of Life Cycle Cost and Carbon Emission of Precast and Cast-in Place Systems

รัชชานนท์ เอี่ยมรอด[1,*] และ นคร กกแก้ว[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: 6470351321@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ และยังมีแนวโน้มที่จะมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลต่อความต้องการวัสดุ แรงงาน และมลพิษที่เพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อลดปัญหาด้านแรงงาน เจ้าของโครงการได้หันมาใช้วิธีการก่อสร้างใหม่ ๆ มากขึ้น เช่น ระบบหล่อสำเร็จรูป เป็นต้น โดยมีการประเมินว่าระบบหล่อสำเร็จช่วยลดการใช้แรงงานได้ถึง 50% และลดเวลาก่อสร้างได้ 30% อย่างไรก็ตาม ต้นทุนก่อสร้างเป็นเพียงส่วนหนึ่งของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน และราคาวัสดุและค่าแรงในช่วงการใช้งานก็มีความไม่แน่นอน ทำให้ผลการประเมินต้นทุนรวมในช่วงก่อสร้างและใช้งานอาจแตกต่างจากที่ได้ประเมินในช่วงก่อนการก่อสร้าง ดังนั้นการประเมินต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการควรนำปัจจัยที่สำคัญมารวมในการวิเคราะห์ด้วย งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนรวมตลอดอายุของระบบคอนกรีตหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จรูป โดยประเมินต้นทุนแฝงที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการทำงาน พร้อมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการด้วยวิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหว นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนที่เกิดขึ้นในกิจกรรมก่อสร้างโดยวิธี Coefficient method เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของการก่อสร้างทั้ง 2 แบบ

คำสำคัญ: ต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน, คอนกรีตสำเร็จรูป, คอนกรีตหล่อในที่, ความเสี่ยง

Abstract

Construction industry plays a significant role in economic grow, and the industry will continue to grow with the economic expansion. However, the industry is known for its labor-intensive, and it could be responsible for more than half of the depletion of the world's natural resources and for polluting the world with greenhouse gases generated from material extraction to all related construction activities. Therefore, the growth of the industry may also lead to an increase in pollution and the demand of construction materials and workers. In order to shorten construction time and address labor issues, developers have explored new systems of construction such as a precast system, which is believed to help save up to 50% of labor costs and reduce about 30% of construction time. However, in comparison of construction systems, construction costs are only upfront costs, and maintenance and repairing costs of each system should be included into life cycle cost analysis. This paper is to present a comparative study of risk-based life cycle cost and carbon emission between precast and cast-in place systems. In modelling life cycle costs, sensitivity analysis will be employed to incorporate uncertainty into the proposed model. The study also assesses the amount of carbon emissions using a coefficient method. The results of the study show the comparison of the LCC and carbon emissions between the two construction methods.

Keywords: Life-cycle cost, Precast, Cast-in place, Risk

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ไม่ว่าจะเป็นทั้งในด้านเศรษฐกิจและด้านสังคม โดยอุตสาหกรรมก่อสร้างได้รับการสนับสนุนจากงบประมานภาครัฐสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมประเทศ เช่น ถนน ระบบขนส่งสาธารณะ โรงพยาบาล สถานศึกษา เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนและสนับสนุนการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ

แนวโน้มอุตสาหกรรมการก่อสร้างในอนาคตจะยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีแรงขับเคลื่อนหลักจากการลงทุนโครงการขนาดใหญ่ของภาครัฐ ดังนั้นการขยายตัวทางการลงทุนของภาคการก่อสร้าง ทั้งโครงสร้างพื้นฐานและโครงการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ต่าง ๆ ย่อมส่งผลต่อความต้องการวัสดุก่อสร้าง ซึ่งความต้องการนี้ย่อมส่งผลต่อราคาวัสดุที่สูงขึ้นตาม [7] คอนกรีตถือเป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งมีทั้งการใช้ในโครงการในรูปแบบของการหล่อในที่ และในรูปแบบคอนกรีต

หล่อสำเร็จ ซึ่งพบว่า อุตสาหกรรมคอนกรีตหล่อสำเร็จ ของภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก มีการเติบโตเร็วในระดับสูงและมีมูลค่าทางตลาดมากที่สุดในโลก เนื่องจากมีปัจจัยสนับสนุนที่ดี โดยมีอัตราการเติบโตประมาณ 6.6% ต่อปี [4]

ผู้พัฒนาอสังหาริมทรัพย์มองว่าระบบคอนกรีตสำเร็จรูปช่วยทำให้การพัฒนาโครงการเป็นไปได้รวดเร็วและลดการใช้แรงงานได้ โดยศูนย์วิจัยกสิกรไทย [12] ระบุว่า การใช้ระบบคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น มีส่วนช่วยทำให้ต้นทุนรวมของโครงการก่อสร้างลดลงโดยเฉลี่ย 15% ต่อโครงการ โดยเกิดจากการลดการใช้แรงงานประมาณ 50% และระยะเวลาก่อสร้างที่เร็วขึ้นประมาณ 30% เมื่อเทียบกับระบบหล่อในที่ (Cast-in place) หรือระบบก่อสร้างเดิม

อย่างไรก็ตามระบบหล่อสำเร็จ (Precast concrete) ยังพบว่ามีค่าใช้จ่ายแฝงที่เกิดขึ้นหลังการติดตั้งโดยเจ้าของโครงการมักประสบกับปัญหาในการจ่ายค่าซ่อมแซมบำรุงรักษาที่เกิดขึ้นในช่วงการใช้งานที่สูงขึ้น เช่น แผ่นผนังร้าว หรือ เกิดการรั่วซึม เนื่องมาจากการไม่คำนวณค่าใช้จ่ายรวมในการติดตั้งและบำรุงดูแลรักษาตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการประเมินต้นทุนการก่อสร้างที่ถูกต้อง

ปัญหาหนึ่งที่เจ้าของอาคารหรือผู้ใช้อาคาร (Building owners or users) พบบ่อยในปัจจุบัน คือ บริษัทพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ (Developers) นั้นมักจะมุ่งเน้นพิจารณาต้นทุนรวมจาก (1) ค่าใช้จ่ายในการออกแบบ และ (2) ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างตัวอาคาร โดยอาจไม่คำนึงหรือละเลยต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เนื่องจากอาคารชุด (Condominium) เมื่อพัฒนาและขายแล้วเสร็จ บริษัทพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ (Developers) จะโอนกรรมสิทธิ์ให้ผู้ซื้อและนิติบุคคลเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและซ่อมแซมบำรุงรักษา ซึ่งต้นทุนการดำเนินงานและซ่อมแซมบำรุงรักษา (O&M) ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของต้นทุนวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (กรณีรวมต้นทุนการใช้งานอื่น ๆ เช่น ค่าไฟฟ้า เป็นต้น) ดังนั้นหากไม่นำต้นทุนการดำเนินงานและซ่อมแซมบำรุงรักษามารวมในการประเมินต้นทุนรวม อาจส่งผลต่อการประเมินต้นทุนการก่อสร้างที่ไม่ครอบคลุมครบถ้วน เพราะเน้นต้นทุนของบริษัทพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ (Developers) เพียงด้านเดียว

อีกทั้งในปัจจุบันการก่อสร้างโดยใช้ระบบนี้ยังทำให้เกิดผลกระทบของแต่ละกระบวนการต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะวิกฤติภาวะโลกร้อน ที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีแหล่งที่มาจากการใช้คอนกรีต Turner & Collins [8] พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement, OPC) หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Type I) ตามมาตรฐาน ASTM C150-07 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ นั้นมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าประมาณ 5% ถึง 7% ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทั้งหมดในโลกที่จากมนุษย์สร้างขึ้น

ดังนั้นเพื่อให้การจัดการต้นทุนในการก่อสร้างให้เกิดความคุ้มค่าต่อเจ้าของอาคารหรือผู้ใช้อาคาร (Building owners or users) บริษัทพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ (Developers) ควรพิจารณาถึงต้นทุนและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสิ่งปลูกสร้างที่ใช้การก่อสร้างระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete) และระบบการก่อสร้างคอนกรีตแบบหล่อในที่ (Cast-in place) โดยรวมต้นทุนหลักที่สำคัญและต้นทุนแฝงต่าง ๆ ของการก่อสร้างทั้ง 2 ระบบ โดยเฉพาะระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete) รวมไปถึงวิเคราะห์ถึงปริมาณสารคาร์บอนที่ปล่อยออกมาตลอดตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของแต่ละรูปแบบของการก่อสร้าง โดยใช้การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของอาคาร (Life-cycle cost analysis, LCCA) ในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตั้งแต่ช่วงก่อนการก่อสร้างและเตรียมการ ก่อสร้าง และช่วงดำเนินงานหรือใช้งาน (Preconstruction-Construction-Operation) โดยในช่วงดำเนินการจะเป็นช่วงที่ต้องการตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าใช้จ่ายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยนำปัจจัยเสี่ยงของต้นทุนวัสดุในอนาคตมาประกอบการพยากรณ์ด้วย

จากสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น งานวิจัยนี้ต้องการเสนอแนวทางการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบหาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนตลอดอายุการใช้งานที่แตกต่างกันของ (1) ระบบหล่อในที่ และ (2) ระบบหล่อสำเร็จ โดยใช้วิธีสัมประสิทธิ์ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อให้เจ้าของโครงการนำผลการศึกษาที่ได้ไปประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้รูปแบบและวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงในอนาคต และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนากระบวนการก่อสร้างให้เกิดประโยชน์ต่อเจ้าของโครงการและต่อสังคมด้วย

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

2.1 วัตถุประสงค์

1) เพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนตลอดอายุการใช้งานของ (1) ระบบหล่อในที่ และ (2) ระบบหล่อสำเร็จ โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลสนามในช่วงการก่อสร้างและการพยากรณ์ค่าใช้จ่ายในช่วงการใช้งาน และใช้วิธีสัมประสิทธิ์ (Coefficient method) ในการประเมินปริมาณการปล่อยสารคาร์บอน
2) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงสำคัญที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่แตกต่างกันของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ โดยใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร (Sensitivity analysis)

2.2 ขอบเขตการศึกษา

1) การศึกษางานวิจัยเรื่องนี้จะเน้นเปรียบเทียบมูลค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและประเมินก๊าซเรือนกระจกเฉพาะ CO_2 ระหว่างงานระบบหล่อในที่ และ ระบบหล่อสำเร็จ โดยกำหนดช่วงเวลาของข้อมูลเป็น 3 ช่วง คือ 1. ช่วงเตรียมการก่อนการก่อสร้าง (Preparing phase) 2. ช่วงระหว่างการก่อสร้าง

(Construction phase) 3. ช่วงดำเนินงานหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ (O&M phase)

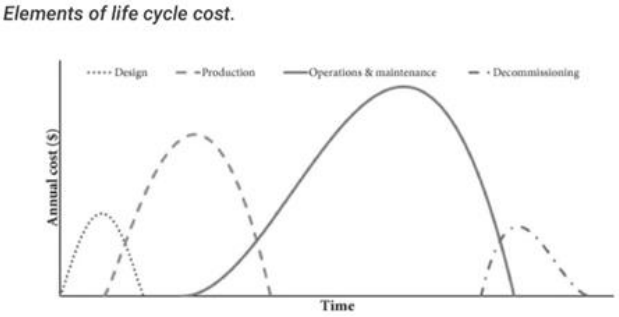
2) ประเภทสิ่งปลูกสร้างที่ทำการศึกษา คือ อาคารชุดที่อยู่อาศัย ที่กำลังก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life - Cycle Cost)

ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life - Cycle Cost, LCC) เป็นการคำนวณมูลค่าปัจจุบัน (present value) ของต้นทุนตลอดช่วงอายุของสินทรัพย์ตั้งแต่การก่อสร้างจนถึงการรื้อทำลายหรือเปลี่ยนใหม่ โดยการคำนวณนี้จะใช้เป็นตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการประเมินความเหมาะสมของโครงการสำหรับค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ซึ่งในกระบวนการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกันจะต้องแปลงให้เป็นมูลค่าเงินให้เป็นปัจจุบัน (present value) [10] Life Cycle Cost (LCC) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการคำนวณความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์จากค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้น ตั้งแต่ค่าใช้จ่ายในการออกแบบ ก่อสร้าง ดูแลรักษา และการดำเนินการต่าง ๆ ของโครงการ LCC สามารถช่วยในการประเมินผลของการออกแบบในแต่ละทางเลือกเพื่อให้เกิดความมั่นใจต่อการลงทุน [6]

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าใช้จ่ายรายปีตลอดวัฏจักรวงจรชีวิต



รูปที่ 1 มูลค่าค่าใช้จ่ายตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ [2]

ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$LCC = \sum_{t=0}^{T} \frac{C_t}{(1+i)^t} \qquad (1)$$

โดย LCC คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต

C_t คือ ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ณ ปีที่ t

T คือ ระยะเวลาของวัฏจักรชีวิต

3.2 ระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ

ระบบหล่อในที่ (Cast-in place system: CIP) คือ ระบบก่อสร้างที่สร้างชิ้นส่วนหรือองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เป็นโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างที่ต้องสร้าง ณ สถานที่ก่อสร้าง โดยจะมีแบบหล่อไว้เป็นตัวแบบ เช่น เสา คาน พื้น เป็นต้นซึ่งระบบนี้สามารถลดหรือขยายต่อเติมองค์ประกอบหรือชิ้นส่วนโครงสร้างสิ่งก่อสร้างได้ค่อนข้างสะดวก

ส่วนระบบหล่อสำเร็จ (Precast concrete system: PC) คือ ระบบการก่อสร้างที่ใช้วัสดุหรือชิ้นส่วนสำเร็จรูปมาประกอบและติดตั้ง ณ สถานที่ก่อสร้าง ซึ่งชิ้นส่วนสำเร็จรูปต่าง ๆ นั้นต้องมีการรองรับมาตรฐานทางด้านวิศวกรรม และยังสามารถช่วยลดการเวลาในการก่อสร้างรวมไปถึงค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน สืบตระกูล สมบัติทิพย์ [11] นิยาม ระบบหล่อสำเร็จว่าเป็น ระบบก่อสร้างที่ผลิตชิ้นส่วนอาคารออกเป็นส่วน ๆ แล้วนำมาติดตั้งประกอบกัน ณ ที่ก่อสร้าง หรือผลิตจากโรงงานเสร็จแล้ว แล้วสามารถนำไปเคลื่อนย้ายเพื่อนำไปใช้สอยได้ทันที

3.3 โมเดลการคำนวณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การตั้งตัวแปรในโมเดลการคำนวณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการบ่งบอกถึงช่วงของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแหล่งที่มาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรของการวัดเป็นดังนี้

PC คือ ชิ้นส่วนของสิ่งก่อสร้างที่ใช้วัสดุการก่อสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete)

CIP คือ ชิ้นส่วนของสิ่งก่อสร้างที่ใช้วัสดุการก่อสร้างแบบคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place concrete)

i คือ ช่วง หรือ Phase ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบ่งเป็น

$i=1$ คือ ช่วงเตรียมการ (Preparing phase)

$i=2$ คือ ช่วงก่อสร้าง (Construction phase)

$i=3$ คือ ช่วงการใช้งาน (O&M phase)

j คือ แหล่งที่มาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบ่งเป็น

$j=1$ คือ จากวัตถุนั้นโดยตรง

$j=2$ คือ จากการใช้พลังงานต่าง ๆ ในกิจกรรมต่าง ๆ โดยเป็นการวัดปริมาณก๊าซ CO_2 ที่คำนวณมาจากเครื่องจักรเป็นหลัก

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$E_{i-j}[PC]$ และ $E_{i-j}[CIP]$

(2) สำหรับชิ้นส่วนของสิ่งก่อสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete) และแบบคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place Concrete)

จากสมการที่ (2) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของกระบวนการของงานคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete) และงานคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place concrete) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

E_{1-1} คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากวัตถุนั้นโดยตรง ในช่วงเตรียมการ โดยแบ่งออกได้เป็น

- $E_{1-1}[PC]$ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นโดยตรง ในช่วงเตรียมการ
- $E_{1-1}[CIP]$ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากคอนกรีตหล่อในที่นั้นโดยตรง ในช่วงเตรียมการ

3.3.1 โมเดลการวัดปริมาณก๊าซ CO_2 ที่มาจากวัสดุโดยตรง

ปริมาณก๊าซ CO_2 ที่มาจากวัสดุโดยตรง ประมาณได้โดยใช้วิธี Coefficient method [5] ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$E_{i-1} = \sum_{p=1}^{m}\sum_{q=1}^{n}[\frac{A_p}{A'_p} \times M_{pq} \times f_q] \quad (3)$$

โดยที่ $p \in \{1,2,3,...,m\}$ คือ กิจกรรมย่อยต่าง ๆ ของกระบวนการก่อสร้าง ส่วน A_p คือ ปริมาณงานที่เกิดขึ้นจริงของกิจกรรม p ; A'_p คือ ปริมาณงานที่คิดไว้ของกิจกรรม p ; M_{pq} คือ ปริมาณวัตถุดิบ q ที่ใช้ต่อ 1 หน่วยของ A'_p ที่ใช้ในกิจกรรม p ; และ f_q คือ Carbon emission factor จากวัตถุดิบ q

3.3.2 โมเดลการวัดปริมาณก๊าซ CO_2 ที่มาจากเครื่องจักร

ส่วนปริมาณก๊าซ CO2 ที่มาจากเครื่องจักร ประมาณได้โดยใช้วิธี Coefficient method [5] มีสมการเป็นดังนี้

$$E_{i-2} = \sum_{p=1}^{m}\sum_{q'=1}^{n'}[\frac{A_p}{A'_p} \times M_{pq'} \times f_{q'} \times C_{q'}] \quad (4)$$

โดยที่ $f_{q'}$ คือ Carbon emission factor จากเครื่องจักร q' และ $C_{q'}$ คือ ปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องจักร q'

แต่เนื่องด้วย การพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จนั้น มีการใช้วัตถุดิบที่เป็นคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ดังนั้นระยะทางการขนส่งคอนกรีตของทั้ง 2 ระบบจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการคำนวณค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยค่าแฟกเตอร์ (Factor) ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของวัสดุและการขนส่ง เป็นดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Factor ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของวัสดุและการขนส่ง

ลำดับที่	รายการ	ค่า Factor	หน่วย	แหล่งข้อมูล
1	รถบรรทุกซีเมนต์แบบโม่ 10 ล้อ 100% loading (คิดขาไป)	0.0611	$kgCO_2e/km$	[13]
2	รถบรรทุกซีเมนต์แบบโม่ 10 ล้อ 0% loading (คิดขากลับ)	0.7382	$kgCO_2e/km$	[13]
3	รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ 100% loading (คิดขาไป)	0.215	$kgCO_2e/km$	[13]
4	รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ 25% loading (คิดขากลับ)	0.0536	$kgCO_2e/km$	[13]
5	f_q จากคอนกรีต	347.643	kg/m^3	[5]

3.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เป็นการวิเคราะห์ระดับของผลกระทบของตัวแปรตาม (Output variable) เช่น ต้นทุนรวม หรือผลตอบแทน เป็นต้น ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของชุดของตัวแปรต้น (Input variables) เช่น ต้นทุนวัสดุ ค่าขนส่ง อัตราดอกเบี้ย เป็นต้น อีกทั้งการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ยังใช้เพื่อทดสอบความมั่นคงของข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์บนสมมติฐานของช่วงพิสัยของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นของการศึกษา โดยช่วงพิสัยของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นขึ้นกับดุลพินิจของตัวผู้วิจัย [1] หรือกล่าวคือการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเป็นการกำหนดหาค่าที่เป็นตัวแปรอิสระที่ต่างๆ ที่ส่งผลต่อตัวแปรตามภายใต้สมมติฐานที่กำหนด ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหนักแน่นหรือความเสถียรของผลลัพธ์จากการทำการทดลอง โดยจะทดสอบจากการเปลี่ยนแปลงค่าบางอย่างในการศึกษานั้น ๆ เพื่อหาว่าการเปลี่ยนค่านั้น ๆ มีผลกระทบต่อผลลัพธ์สุดท้ายหรือไม่ ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีที่ทำให้ตัวให้ได้ตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง รวมไปถึงช่วยในการลดความไม่แน่นอนของการทดลอง [9]

4. ตัวแบบการประเมินต้นทุนรวมตลอดอายุของระบบคอนกรีตหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จรูป

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมา สามารถนำมาสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการการประเมินต้นทุนรวมตลอดอายุของระบบคอนกรีตหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จรูป โดยรายละเอียดของตัวแบบสำหรับแต่ละระบบการก่อสร้างเป็นดังนี้

4.1 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อในที่

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการการประเมินต้นทุนรวมตลอดอายุของระบบคอนกรีตหล่อในที่ เป็นดังแสดงในสมการที่ (5)

$$LCC[CIP] = \sum_{t=0}^{t=T_{CIP}} \frac{C_{CIP,k,t}}{(1+i)^t} \text{ โดยที่ } k \in \{1,2,3,...,7\} \quad (5)$$

โดย $LCC[CIP]$ คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่; $C_{CIP,k,t}$ คือ ต้นทุนของงาน k ณ ปีที่ t โดยมีงานทั้งหมด 7 รายการ; i คือ อัตราคิดลดโดยใช้อัตราเงินเฟ้อ; T_{CIP} คือ ระยะเวลารวมช่วงก่อสร้างและช่วงใช้งาน

ส่วน $C_{CIP,k,t}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) ดังนี้

$$C_{CIP,t} = C_{CIP,pp,t} + C_{CIP,cp,t} + C_{CIP,OM,t} \quad (6)$$

เมื่อ $C_{CIP,pp,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงเตรียมการ มี 1 รายการ คือ งานออกแบบ(k = 1)

$C_{CIP,cp,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงก่อสร้าง มี 4 รายการ ได้แก่ งาน Preliminary (k = 2), งานก่อสร้าง (k = 3), ต้นทุน Contingency cost (k = 4), ต้นทุน Admin (k = 5)

$C_{CIP,OM,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วง มี 2 รายการ ได้แก่ งาน Preventive maintenance (k = 6), งาน Major repair (k = 7)

4.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อสำเร็จ

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการการประเมินต้นทุนรวมตลอดอายุของระบบคอนกรีตหล่อในที่ เป็นดังแสดงในสมการที่ (7)

$$LCC[PC] = \sum_{t=0}^{t=T_{PC}} \frac{C_{PC,k,t}}{(1+i)^t} \text{ โดยที่ } k \in \{1,2,3,...,7\} \quad (7)$$

โดย $LCC[PC]$ คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จ

$C_{PC,k,t}$ คือ ต้นทุนของงาน k ณ ปีที่ t โดยมีงานทั้งหมด 7 รายการ

i คือ อัตราคิดลดโดยใช้อัตราเงินเฟ้อ

T_{PC} คือ ระยะเวลารวมช่วงก่อสร้างและช่วงใช้งานของระบบหล่อสำเร็จ

ส่วน $C_{PC,k,t}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) ดังนี้

$$C_{PC,t} = C_{PC,pp,t} + C_{PC,cp,t} + C_{PC,OM,t} \quad (8)$$

เมื่อ $C_{PC,pp,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงเตรียมการ มี 1 รายการ คือ งานออกแบบ (k = 1)

$C_{PC,cp,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงก่อสร้าง มี 4 รายการ ได้แก่ งาน Preliminary (k = 2), งานก่อสร้าง (k = 3), ต้นทุน Contingency cost (k = 4), ต้นทุน Admin (k = 5)

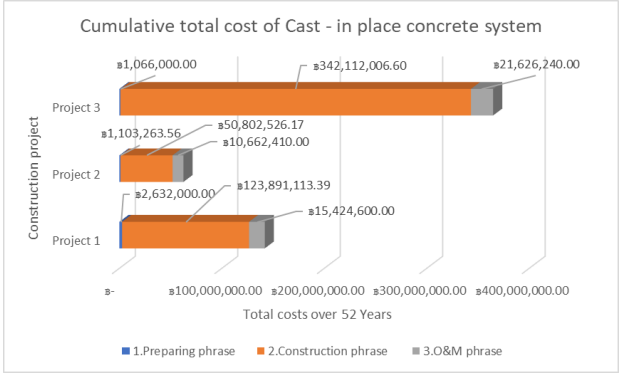
$C_{PC,OM,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงดำเนินการ มี 2 รายการ ได้แก่ งาน Preventive maintenance (k = 6), งาน Major repair (k = 7)

5. ข้อมูลและผลการวิเคราะห์

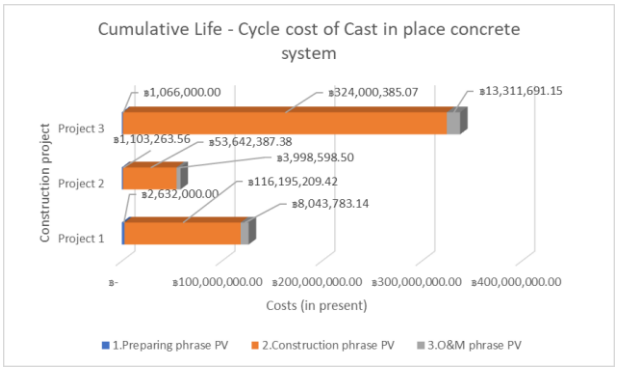
การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบหาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่แตกต่างกันของ (1) ระบบหล่อในที่ และ (2) ระบบหล่อสำเร็จนั้น ตัวผู้ทำวิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์และขอข้อมูลภาคสนามจากสถานที่ก่อสร้างอาคารประเภทอาคารชุดที่อยู่อาศัย (Condominium) 3 แห่ง โดยทั้ง 3 โครงการนั้น มีวิศวกรที่รับผิดชอบโครงการการก่อสร้างเป็นผู้ให้ข้อมูล ซึ่งหลังจากทำการเก็บข้อมูลภาคสนามเสร็จ ผู้ทำวิจัยได้สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ โดยกำหนดให้อายุของระบบทั้งสอง (Service life) เป็นประมาณ 52 ปี [3] และจำลองค่าใช้จ่ายจากการซ่อมแซมตัวอาคารรวมไปถึงรวบรวมข้อมูลภาคสนามและจากการสัมภาษณ์

5.1 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อในที่

หลังจากรวบรวมข้อมูลแล้วเสร็จ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์หาต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่จากทั้ง 3 โครงการก่อสร้างประเภทอาคารชุด ซึ่งผลการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2 และ รูปที่ 3



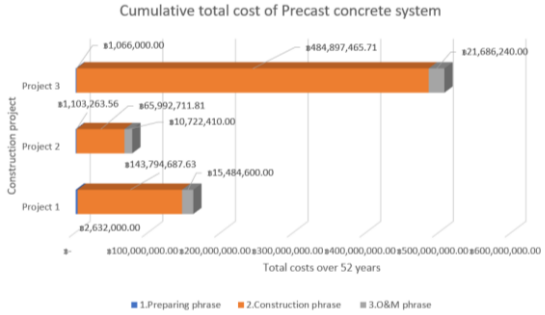
รูปที่ 2 โครงสร้างของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่ของโครงการตัวอย่าง



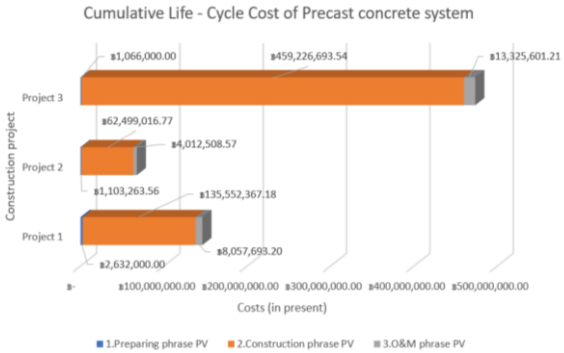
รูปที่ 3 มูลค่าปัจจุบัน (Present value) ของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่ของโครงการตัวอย่าง

5.2 การวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อสำเร็จ

ส่วนการหาต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จ จากทั้ง 3 โครงการก่อสร้างประเภทอาคารชุด ได้ผลการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานเป็นดังแสดงในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5



รูปที่ 4 โครงสร้างของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จของโครงการตัวอย่าง



รูปที่ 5 มูลค่าปัจจุบัน (Present value) ของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จของโครงการตัวอย่าง

5.3 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้านต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์หาปัจจัยเสี่ยงของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4 และใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เพื่อหาปัจจัยเสี่ยงสำคัญที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน จากตัวแปรต้นทั้งหมด 8 ตัวแปรของสมการที่ (5) – (8) ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนทั้งระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ

รายละเอียดในการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) นั้น ผู้วิจัยทำการเพิ่มค่าและลดค่าตัวแปรต่าง ๆ ทีละตัวแปร เพื่อวิเคราะห์ว่าตัวแปรใดที่ส่งผลต่อค่า $LCC[PC]$ และ $LCC[CIP]$ และทำการเรียงลำดับตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าผลที่ได้จากกรณีฐาน (Base case) ซึ่งการเพิ่มค่าและลดค่าตัวแปรนั้นจะทำการเพิ่มและลด 10% และ 20% ตามลำดับ

เพื่อให้ได้ตัวแปรที่ส่งผลให้ $LCC[PC]$ หรือ $LCC[CIP]$ มีการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยจะทำการเฉลี่ยข้อมูลจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนทั้งระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จที่ผ่านการวิเคราะห์ความอ่อนไหวมาทั้ง 3 โครงการและสร้าง Tornado diagram เพื่อบ่งชี้ว่าตัวแปรไหนที่เป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญ (Risk factor) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $LCC[PC]$ และ $LCC[CIP]$

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของโครงการตัวอย่างเป็นดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระบบหล่อในที่โครงการตัวอย่างที่ 1 กรณีปรับค่าตัวแปร ±20% ค่าต้นทุนตลอดอายุกรณีฐาน = ($LCC[CIP_1]$) = 126,870,992 บาท

ตัวแปร	$LCC[CIP_1]$	% การเปลี่ยนแปลง	$LCC[CIP_1]$	% การเปลี่ยนแปลง
ต้นทุนในช่วงเตรียมการ	126,344,592	-0.41	127,397,392	0.41
ต้นทุนงาน Preliminary	123,064,292	-3.00	130,677,692	3.00
ต้นทุนงานก่อสร้าง	122,605,574	-3.36	131,136,410	3.36
Contingency cost	126,439,587	-0.34	127,302,397	0.34
ต้นทุน Admin	112,135,473	-11.61	141,606,511	11.61
Preventive maintenance	125,643,198	-0.97	128,098,787	0.97
Major repair	126,490,030	-0.30	127,251,954	0.30
อัตราเงินเฟ้อ	129,063,159	1.73	124,861,575	-1.58

ตารางที่ 3 ระบบหล่อในที่โครงการตัวอย่างที่ 2 กรณีปรับค่าตัวแปร ±20% ค่าต้นทุนตลอดอายุกรณีฐาน = ($LCC[CIP_2]$) = 55,904,388 บาท

ตัวแปร	$LCC[CIP_1]$	% การเปลี่ยนแปลง	$LCC[CIP_1]$	% การเปลี่ยนแปลง
ต้นทุนในช่วงเตรียมการ	55,683,735	-0.39	56,125,040	0.39
ต้นทุนงาน Preliminary	52,120,756	-6.77	59,688,019	6.77
ต้นทุนงานก่อสร้าง	51,074,331	-8.64	60,734,445	8.64
Contingency cost	55,851,209	-0.10	55,957,567	0.10
ต้นทุน Admin	54,410,750.	-2.67	57,398,025	2.67
Preventive maintenance	55,485,630	-0.75	56,323,145	0.75
Major repair	55,523,426	-0.68	56,285,350	0.68
อัตราเงินเฟ้อ	57,045,495	2.04	54,918,605	-1.76

ตารางที่ 4 ระบบหล่อในที่โครงการตัวอย่างที่ 3 กรณีปรับค่าตัวแปร ±20% ค่าต้นทุนตลอดอายุกรณีฐาน = ($LCC[CIP_3]$) = 338,378,076 บาท

ตัวแปร	$LCC[CIP_1]$	% การเปลี่ยนแปลง	$LCC[CIP_1]$	% การเปลี่ยนแปลง
ต้นทุนนช่วงเตรียมการ	338,164,876	-0.06	338,591,276	0.06
ต้นทุนงาน Preliminary	327,977,937	-3.07	348,778,214	3.07
ต้นทุนงานก่อสร้าง	295,519,102	-12.67	381,237,049	12.67
Contingency cost	338,114,210	-0.08	338,641,942	0.08
ต้นทุน Admin	327,100,977	-3.33	349,655,175	3.33
Preventive maintenance	336,096,700	-0.67	340,659,452	0.67
Major repair	337,997,114	-0.11	338,759,038	0.11
อัตราเงินเฟ้อ	342,744,993	1.29	334,234,701	-1.22

ตารางที่ 5 โครงการระบบหล่อสำเร็จโครงการตัวอย่างที่ 1 กรณีปรับค่าตัวแปร ±20% และค่าต้นทุนตลอดอายุกรณีฐาน = ($LCC[PC_1]$) = 146,262,060 บาท

ตัวแปร	$LCC[PC_1]$	% การเปลี่ยนแปลง	$LCC[PC_1]$	% การเปลี่ยนแปลง
ต้นทุนในช่วงเตรียมการ	145,715,660	-0.06	338,591,276	0.06

ต้นทุนงาน Preliminary	138,545,062	-0.36	146,768,460	0.36
ต้นทุนงานก่อสร้าง	138,264,060	-5.26	153,939,057	5.26
Contingency cost	145,810,655	-5.46	154,220,060	5.46
ต้นทุน Admin	135,237,988	-0.29	146,673,465	0.29
Preventive maintenance	145,014,265	-7.52	157,246,131	7.52
Major repair	145,858,316	-0.84	147,469,854	0.84
อัตราเงินเฟ้อ	148,547,097	-0.26	146,625,804	0.26

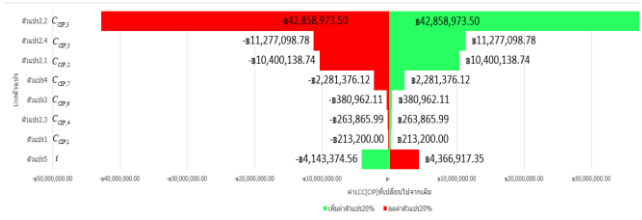
ตารางที่ 6 โครงการระบบหล่อสำเร็จโครงการตัวอย่างที่ 2 กรณีปรับค่าตัวแปร ±20% และค่าต้นทุนตลอดอายุกรณีฐาน = (LCC[PC_2]) = 67,614,789 บาท

ตัวแปร	LCC[PC_2]	% การเปลี่ยนแปลง	LCC[PC_2]	% การเปลี่ยนแปลง
ต้นทุนในช่วงเตรียมการ	67,394,136	-0.33	67,835,441	0.33
ต้นทุนงาน Preliminary	63,831,157	-5.60	71,398,420	5.60
ต้นทุนงานก่อสร้าง	60,100,748	-11.11	75,128,829	11.11
Contingency cost	67,561,609	-0.08	67,667,967	0.08
ต้นทุน Admin	66,465,837	-1.70	68,763,740	1.70
Preventive maintenance	67,196,031	-0.62	68,033,546	0.62
Major repair	67,231,044	-0.57	67,998,533	0.57
อัตราเงินเฟ้อ	68,884,941	1.88	66,503,405	-1.64

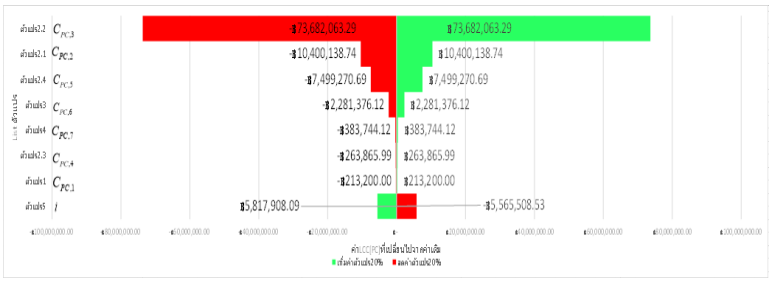
ตารางที่ 7 โครงการระบบหล่อสำเร็จโครงการตัวอย่างที่ 3 กรณีปรับค่าตัวแปร ±20%
ค่าต้นทุนตลอดอายุกรณีฐาน = (LCC[PC_3] = 473,618,294 บาท

ตัวแปร	LCC[PC_3]	% การเปลี่ยนแปลง	LCC[PC_3]	% การเปลี่ยนแปลง
ต้นทุนในช่วงเตรียมการ	473,405,094	-0.05	473,831,494	0.05
ต้นทุนงาน Preliminary	463,218,156	-2.20	484,018,433	2.20
ต้นทุนงานก่อสร้าง	399,936,231	-15.56	547,300,358	15.56
Contingency cost	473,354,428	-0.06	473,882,160	0.06
ต้นทุน Admin	466,119,024	-1.58	481,117,565	1.58
Preventive maintenance	471,336,918	-0.48	475,899,670	0.48
Major repair	473,234,550	-0.08	474,002,038	0.08
อัตราเงินเฟ้อ	479,436,202	1.23	468,052,786	-1.18

สำหรับตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เป็นดังแสดงในรูปที่ 6-7



รูปที่ 6 Tornado diagram ของระบบหล่อในที่ กรณีปรับค่าตัวแปร ±20%



รูปที่ 7 Tornado diagram ของระบบหล่อสำเร็จ กรณีปรับค่าตัวแปร ±20%

โดยผลการวิเคราะห์การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรในตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุใช้งานของระบบหล่อในที่จาก Tornado diagram พบว่าโดยเฉลี่ยมี 4 ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อค่า $LCC[CIP]$ มากที่สุด โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้

$$C_{CIP,3} > C_{CIP,5} > C_{CIP,2} > i$$

นั่นคือ ต้นทุนก่อสร้าง มีความเสี่ยงมากที่สุด รองลงมาคือ ต้นทุน Admin ต้นทุน Preliminary และ อัตราเงินเฟ้อ ตามลำดับ

ส่วนผลการวิเคราะห์การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรในตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุใช้งานของระบบหล่อสำเร็จจาก Tornado diagram พบว่าโดยเฉลี่ยมี 4 ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อค่า $LCC[PCF]$ มากที่สุด โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้

$$C_{PC,3} > C_{PC,2} > C_{PC,5} > i$$

นั่นคือ ระบบหล่อสำเร็จมีต้นทุนก่อสร้างเป็นความเสี่ยงมากที่สุด รองลงมาคือ ต้นทุน Preliminary ต้นทุน Admin และ อัตราเงินเฟ้อ ตามลำดับ

5.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการขนส่งคอนกรีตทั้ง 2 ระบบ โดยได้ผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 8 – 9

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ CO_2 ในระบบหล่อในที่ 3 โครงการ

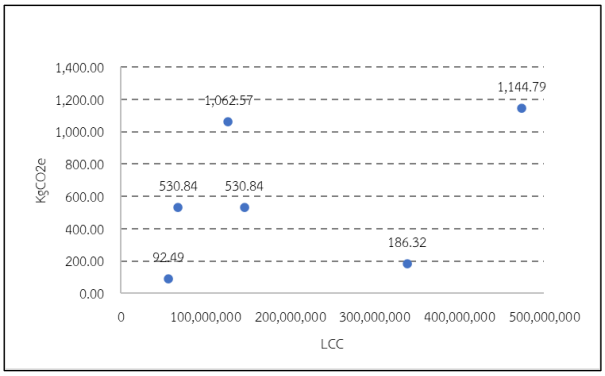
Cast-in place	Transportation (Kg.CO_2e)	Total Embodied CO_2 (Kg.CO_2e)
Project 1	1,062.57	2,304.31
Project 2	92.49	406.97
Project 3	186.32	1493.32

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ CO_2 ในระบบหล่อสำเร็จ 3 โครงการ

Precast	Transportation ($Kg.CO_2e$)	Total Embodied CO_2 ($Kg.CO_2e$)
Project 1	530.84	1,772.58
Project 2	249.60	564.08
Project 3	1,144.79	2,451.79

5.4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบ LCC และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการประเมิน LCC และ ปริมาณ CO_2 จากโครงการตัวอย่างของทั้ง 2 ระบบ เป็นดังแสดงในรูปที่ 8 โดยระบบหล่อในที่จะมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย (เฉพาะกิจกรรมการขนส่ง) ต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานประมาณ 2.57 $KgCO_2e$/ล้านบาท ส่วนระบบหล่อสำเร็จจะมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย (เฉพาะกิจกรรมการขนส่ง) ต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานประมาณ 3.21 $KgCO_2e$/ล้านบาท



รูปที่ 8 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน

6. อภิปรายผลการศึกษา

จากตารางที่ 2-7 และ รูป 6-7 พบว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานมี 3 ปัจจัยนี้ ได้แก่ ต้นทุนงานก่อสร้าง ต้นทุนงาน Preliminary และต้นทุน Admin โดยจากรูปที่ 6 และ 7 ของ โครงการตัวอย่างที่ 3 ที่เป็นระบบหล่อในที่กับระบบหล่อสำเร็จ เมื่อพิจารณา $C_{PC,5}$ หรือ ต้นทุนงาน Admin ในระบบหล่อสำเร็จ กับ $C_{CIP,5}$ หรือ ต้นทุนงาน Admin ในระบบหล่อในที่นั้น พบว่าค่า $C_{CIP,5} > C_{PC,5}$ ซึ่งหมายความว่า การก่อสร้างที่ใช้ระบบหล่อในที่นั้นจะมีค่าใช้แฝงและค่าใช้จ่ายในการบริหารที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานที่สูงกว่าระบบหล่อสำเร็จ

อย่างไรก็ตามการก่อสร้างที่ใช้ระบบหล่อสำเร็จนั้นจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการ นั่นจึงหมายความว่า การก่อสร้างที่ใช้ระบบหล่อสำเร็จจะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายทางด้านแรงงานไปด้วยเช่นกัน ซึ่งตรงกับสมมุติฐานที่ศูนย์วิจัยกสิกรไทย (กระแสทรรศน์ ฉบับที่ 3155, 2563) นั้นได้กล่าวไว้

7. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบหาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่แตกต่างกันของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จโดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อหาต้นทุนตลอดอายุการใช้งานนั้น พบว่า ทั้ง 2 ระบบนั้นมี 3 ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานโดยเรียงลำดับจากปัจจัยสำคัญที่สุดเหมือนกันทั้ง 2 ระบบ นั่นคือ ต้นทุนในการก่อสร้าง ทั้งนี้เพราะว่าในโครงการก่อสร้าง สิ่งที่จะมีผลต่อมูลค่าของโครงการก่อสร้างนั้นมากที่สุด คือ ราคาก่อสร้าง ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่เจ้าของโครงการหรือเจ้าของอาคารนั้นต้องคำนึงถึงมากที่สุด

ส่วนต้นทุนในการบริหารจัดการและต้นทุนงาน Preliminary พบว่าทั้ง 2 ระบบมีความแตกต่างกัน โดยระบบสำเร็จรูปพบว่า ต้นทุนงาน Preliminary มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานรวม สูงกว่าต้นทุนในการบริหารจัดการ ซึ่งตรงกันข้ามกับระบบหล่อในที่ที่มีต้นทุนในการบริหารจัดการสูงกว่าต้นทุนงาน Preliminary

โดยต้นทุนในการเตรียมการก่อสร้างถือเป็นต้นทุนความสำคัญ ทั้งนี้เพื่อให้วัสดุที่ใช้เตรียมการนั้นเป็นไปอย่างเหมาะสมสอดคล้องกับแผนการทำงาน เพื่อไม่ให้เกิดความล่าช้าในการจัดหาสัดุที่ต้องใช้ ส่วนต้นทุนในการบริหารจัดการ หรือ Admin cost มีความสำคัญต่อการบริหารงานก่อสร้างเพื่อให้แต่ละฝ่ายของโครงการก่อสร้างสามารถติดต่อประสานงาน และแก้ปัญหากับสำนักงานใหญ่ของผู้รับเหมาและเจ้าของโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของปริมาณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าระบบหล่อสำเร็จจะมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย (เฉพาะกิจกรรมการขนส่ง) ต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน สูงกว่าระบบหล่อในที่ ทั้งนี้เนื่องจากระยะทางการขนส่งรวมของระบบหล่อสำเร็จมักจะสูงกว่าระบบหล่อในที่

โดยการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยนั้นยังไม่ได้ทำการจำลองแบบจำลองมอนติคาร์โล เพื่อนำปัจจัยเสี่ยงที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรของ LCC ของทั้ง 2 ระบบ โดยต้องสร้างสมการและรวมความไม่แน่นอนของราคาวัสดุและค่าแรงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในอนาคต ซึ่งเป็นงานในส่วนถัดไปของงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Attakrai Punpukdee. (2009). Sensitivity Analysis การวิเคราะห์ความอ่อนไหว. [ระบบออนไลน์]. https://www.gotoknow.org/posts/251763

[2] Bidanda, B. (2022). Maynard's Industrial and Systems Engineering Handbook.

[3] Cerclos. (2015). Typical Life Expectancy of Building Components.[ระบบออนไลน์].

https://etoolglobal.com/wp-content/uploads/2015/10/BuildingComponentLifeExpectancy.pdf

[4] Grand View Research (2020) Precast Concrete Market Size & Share Report, 2022-2030. [ระบบออนไลน์]. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/precast-concrete-market

[5] Han, Q., Chang, J., Liu, G., & Zhang, H. (2022). The Carbon Emission Assessment of a Building with Different Prefabrication Rates in the Construction Stage. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(4), 2366.

[6] Hui, S.C.M. (2006). Benefits and potential applications of green roof systems in Hong Kong. In Proceedings of the 2nd Megacities International Conferences 2006, Guangzhou, China, pp. 351-360.

[7] Krungsri Research. (2564). แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-2566: ธุรกิจวัสดุก่อสร้าง. [ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา: https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Construction-Construction-Materials/Construction-Materials/IO/io-construction-materials-21.

[8] Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Construction and building materials, 43, 125-130.

[9] Kenton, W. (2022). Sensitivity Analysis Definition. [ระบบออนไลน์]. https://www.investopedia.com/terms/s/sensitivityanalysis.asp

[10] นิรุทติ์ อมรคณารัตน์. (2564).การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของการปรับปรุงอาคาร.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

[11] สืบตระกูล สมบัติทิพย์. (2554). การบริหารจัดการของอาคารที่ก่อสร้างด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา.

[12] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย กระแสทรรศน์ ฉบับที่ 3155. (2563]) การก่อสร้างด้วย Pre-cast ตอบโจทย์ปัญหาปัจจุบันและอนาคต. [ระบบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-econ/business/Pages/z3155-Precast-Construction.aspx.

[13] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.). แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร. ครั้งที่ 1 (กรกฎาคม 2554). กรุงเทพมหานคร: 2554.