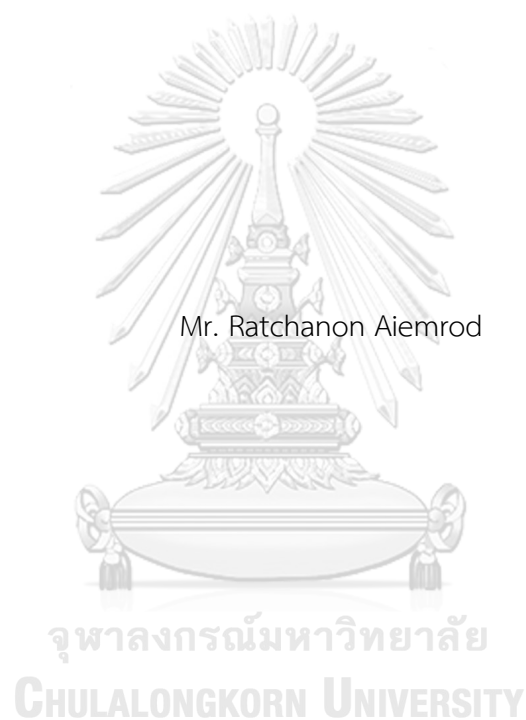


การศึกษาเชิงเปรียบเทียบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนของระบบ
หล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จโดยวิธีมอดีคาร์โลและสัมประสิทธิ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

A Comparative Study of Life-Cycle Cost and Carbon Emission between Cast-in Place
and Prefabrication Systems Using Monte Carlo and Coefficient Methods



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty Of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จโดยวิธีมอนติคาร์โลและสัมประสิทธิ์
โดย	นายรัชชานนท์ เอี่ยมรอด
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.นคร กกแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วัชร เพ็ญสุภาพ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร กกแก้ว)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องกฤษณ์ โตชัยวัฒน์)

รัชชานนท์ เอี่ยมรอด : การศึกษาเชิงเปรียบเทียบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อย
 สารคาร์บอนของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จโดยวิธีมอนติคาร์โลและสัมประสิทธิ์. (A
 Comparative Study of Life-Cycle Cost and Carbon Emission between Cast-in Place
 and Prefabrication Systems Using Monte Carlo and Coefficient Methods) อ.ที่ปรึกษา
 หลัก : รศ. ดร.นคร กกแก้ว

อุตสาหกรรมกรรมการก่อสร้างสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ และยังมีแนวโน้มที่จะมีการเติบโต
 อย่างต่อเนื่อง ส่งผลต่อความต้องการวัสดุ แรงงาน และมลพิษที่เพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อลดปัญหาด้าน
 แรงงาน เจ้าของโครงการได้หันมาใช้วิธีการก่อสร้างใหม่ ๆ มากขึ้น เช่น ระบบหล่อสำเร็จ เป็นต้น โดยมีการ
 ประเมินว่าระบบหล่อสำเร็จช่วยลดการใช้แรงงานได้ถึง 50% และลดเวลาก่อสร้างได้ 30% อย่างไรก็ตาม ต้นทุน
 ก่อสร้างเป็นเพียงส่วนหนึ่งของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน ทำให้ผลการประเมินต้นทุนรวมในช่วงก่อสร้างและใช้
 งานอาจแตกต่างจากที่ได้ประเมินในช่วงก่อนการก่อสร้าง ดังนั้นการประเมินต้นทุนค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ
 ควรนำปัจจัยเสี่ยงมารวมในการวิเคราะห์ด้วย งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนรวมตลอดอายุของระบบ
 คอนกรีตหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ โดยประเมินต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการทำงาน พร้อมทั้ง
 วิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงด้วยวิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวรวมไปถึงการใช้แบบจำลองมอนติคาร์โลเพื่อจำลองหาช่วง
 ค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการงานในโครงการก่อสร้างตัวอย่างทั้ง 6 โครงการ นอกจากนี้ยังศึกษาถึง
 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนที่เกิดขึ้นในกิจกรรมผลิตวัสดุก่อสร้างและการขนส่งเพื่อนำไปใช้เป็นค่าพารามิเตอร์
 ในการประเมินการปล่อยสารคาร์บอนโดยวิธี Coefficient method ในโครงการก่อสร้างตัวอย่างทั้ง 6 โครงการ
 โดยผลลัพธ์ของการศึกษาคือ สัดส่วนของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน ที่ประกอบไปด้วย (1) ต้นทุนในช่วง
 เตรียมการและช่วงก่อสร้าง และ (2) ต้นทุนรวมในช่วงการใช้งานทั้งในมุมมองของระบบหล่อในที่และระบบหล่อ
 สำเร็จในโครงการก่อสร้างตัวอย่างทั้ง 6 โครงการ ซึ่งพบว่าทุกโครงการตัวอย่างของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานทั้ง
 ระบบหล่อในที่และหล่อสำเร็จนั้น มีต้นทุนรวมใน 2 ช่วงแรกมีค่ามากกว่าต้นทุนรวมในช่วงการใช้งาน (O&M
 phase) และยังพบว่าอัตราส่วนของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่ต่อต้นทุนตลอดอายุการใ
 งานของระบบหล่อสำเร็จนั้นในแต่ละโครงการตัวอย่าง อยู่ที่ 0.60 – 0.73 (โดยไม่คำนึงถึงมิติด้านเวลาที่
 แตกต่างกันในช่วงการก่อสร้าง) ในส่วนของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจาก การขนส่งในโครงการก่อสร้าง
 ตัวอย่างทั้ง 6 โครงการ ที่พบว่า ระบบหล่อในที่นั้นมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจาก การขนส่งน้อยกว่า
 ระบบหล่อสำเร็จ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้จะช่วยประกอบการตัดสินใจของเจ้าของโครงการในการเลือกวิธีการ
 ก่อสร้างที่เหมาะสมในบริบทของต้นทุนรวมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6470351321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Life-cycle cost Precast Cast-in place Risk, carbon emission

Ratchanon Aiemrod : A Comparative Study of Life-Cycle Cost and Carbon Emission between Cast-in Place and Prefabrication Systems Using Monte Carlo and Coefficient Methods. Advisor: Assoc. Prof. Dr. NAKHON KOKKAEW

Construction industry plays a significant role in economic growth, and the industry will continue to grow with the economic expansion. However, the industry is known for its labor-intensiveness, 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 generating 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 of material and labor costs into the proposed model. The study also examines, using work study method, the amount of carbon emissions released during the construction, which will then be used to calibrate parameters in the calculation by a coefficient method.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2023

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นบรรลุผลเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้ความรู้ คำชี้แนะ และเสนอแนะทางรวมถึงให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ของข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร กกแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ได้ให้ความช่วยเหลือและสละเวลาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดระยะเวลาที่ได้ทำการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านอันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.วิษระ เพียรสุภาพ รองศาสตราจารย์ ดร.กนกคุณท์ โตชัยวัฒน์ ที่สละเวลาช่วยตรวจสอบและให้ข้อชี้แนะที่เป็นประโยชน์อย่างมากแก่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้และขอขอบพระคุณอาจารย์และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้มอบความรู้และข้อมูลอันเป็นประโยชน์ในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบุคคลากรผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการให้ข้อมูลและบุคลากรที่อำนวยความสะดวกในการให้สถานที่ก่อสร้างเป็นโครงการตัวอย่างของการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุกๆด้านและเป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในระหว่างการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องทำให้ผู้วิจัยทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รัชชานนท์ เอี่ยมรอด

สารบัญ

หน้า

.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	6
1.5 นิยามศัพท์	6
1.5.1 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life-cycle cost).....	6
1.5.2 ระบบคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place concrete system).....	7
1.5.3 ระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete system)	7
บทที่ 2	8
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 บทบาทของอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมและความยั่งยืน	8
2.2 การก่อสร้างโดยใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete system)	11
2.3 วัฏจักรชีวิตและสมรรถนะของโครงการ (Project life cycle and performance).....	15

2.4 ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life-cycle cost).....	18
2.5 เศรษฐศาสตร์งานอาคาร (Building economics)	19
2.5.1 มูลค่าของเงินตามเวลา (Time value of money).....	19
2.5.2 กราฟกระแสเงินสด (Cash flow diagram)	20
2.6 วิธีการประเมินปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนไดออกไซด์	22
2.7 ตัวแบบการรวมต้นทุนรวมตลอดอายุโครงการและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกัน (Integrated life cycle cost and environmental impact assessment models)	27
2.8 ระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ	28
2.9 ความไม่แน่นอนและปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งาน.....	30
2.10 ตัวแบบการพยากรณ์ตัวแปรที่สำคัญ.....	30
2.11 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis).....	32
2.12 แบบจำลองมอนติคาร์โล	33
บทที่ 3	35
ระเบียบวิธีวิจัย	35
3.1 กรอบความคิดเบื้องต้น.....	35
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล	37
3.4 การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์.....	38
3.4.1 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้และปริมาณการ ปล่อยสารคาร์บอน	38
3.4.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณปริมาณสารคาร์บอนหรือก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์.....	40
3.5 สรุปกรอบการคำนวณเชิงเปรียบเทียบ	43
บทที่ 4	44
การประเมินเปรียบเทียบด้านต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC).....	44

4.1 ที่มาของข้อมูลโครงการตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา	44
4.2 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบหล่อ ในที่และระบบหล่อสำเร็จ	45
4.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis).....	62
4.4 Tornado diagram	65
4.5 ผลการจำลองโดยวิธี Monte Carlo.....	68
4.6 สรุปผลการประเมินเปรียบเทียบด้านต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของทั้ง 2 ระบบการ ก่อสร้าง	72
บทที่ 5	75
การประเมินเปรียบเทียบด้านปริมาณสารคาร์บอน	75
5.1 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์การประมาณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	75
5.2 ข้อมูลระยะทางการส่งและขอบเขตในการวัดของแต่ละโครงการ	77
5.3 การพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	79
5.4 สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณ CO ₂ จากการขนส่ง ($E_{transport}$) ของโครงการตัวอย่าง.....	87
บทที่ 6	88
สรุปและอภิปรายผลงานวิจัย	88
6.1 สรุปผลการวิจัย	88
6.2 อภิปรายผลวิจัย	92
6.3 ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยในอนาคต	95
ภาคผนวก.....	97
1.โค้ดโปรแกรม MATLAB R2022b ของระบบหล่อในที่.....	97
2.โค้ดโปรแกรม MATLAB R2022b ของระบบหล่อสำเร็จ	101
3.ข้อมูลใน Microsoft Excel ของ โครงการตัวอย่าง	106
บรรณานุกรม.....	112



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ค่า Factor ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของวัสดุและการขนส่ง.....	42
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของโครงการตัวอย่าง	45
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างต้นทุนคอนกรีตหล่อในที่และหล่อสำเร็จของโครงการตัวอย่างที่ 1... 47	
ตารางที่ 4.3 ต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) โครงการตัวอย่างที่ 1 ของระบบหล่อในที่ (2 ช่วงแรก) 48	
ตารางที่ 4.4 ต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) โครงการตัวอย่างที่ 1 ของระบบหล่อสำเร็จ (2 ช่วงแรก)	49
ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปค่า Construction cost ของแต่ละโครงการ ทั้ง 2 ระบบ	50
ตารางที่ 4.6 สรุปต้นทุนในช่วงเตรียมการและก่อสร้างของแต่ละโครงการ ในระบบหล่อในที่	51
ตารางที่ 4.7 สรุปต้นทุนในช่วงเตรียมการและก่อสร้างของแต่ละโครงการ ในระบบหล่อสำเร็จ	51
ตารางที่ 4.8 ข้อมูล Minor repair cost ของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อในที่.....	53
ตารางที่ 4.9 ข้อมูลรายการ Minor repair cost ของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อสำเร็จ.....	53
ตารางที่ 4.10 ข้อมูล Major repair Cost ของโครงการตัวอย่าง ระบบหล่อสำเร็จ.....	57
ตารางที่ 4.11 ข้อมูล Major repair Cost ของโครงการตัวอย่าง ระบบหล่อในที่.....	58
ตารางที่ 4.12 ต้นทุนในช่วงการใช้งานของโครงการตัวอย่างที่ 1 ของระบบหล่อในที่ (ปีที่ 2-51).....	59
ตารางที่ 4.13 สรุปต้นทุนในช่วงเตรียมการและก่อสร้างของแต่ละโครงการ ในระบบหล่อในที่	61
ตารางที่ 4.14 สรุปต้นทุนในช่วงเตรียมการและก่อสร้างของแต่ละโครงการ ในระบบหล่อสำเร็จ	62
ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการตัวอย่าง กรณีระบบหล่อในที่.....	63
ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการตัวอย่าง กรณีระบบหล่อสำเร็จ.....	64
ตารางที่ 4.17 ผลของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรของโครงการตัวอย่าง.....	67
ตารางที่ 4.18 ผลการประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบคอนกรีตหล่อในที่.....	73
ตารางที่ 4.19 ผลการประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ.....	73

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลระยะทางการขนส่งของโครงการตัวอย่างในระบบหล่อในที่ (CIP)	78
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลระยะทางการขนส่งของโครงการตัวอย่างในระบบหล่อสำเร็จ (PC)	78
ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมในขั้นตอนการผลิต	80
ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณรอบในการขนส่งของระบบหล่อในที่ (โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ).....	80
ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณรอบในการขนส่งของระบบหล่อสำเร็จ (โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป).....	81
ตารางที่ 5.6 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง (ต่อ 1 รอบ)	81
ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง (ต่อ 1 รอบ)	82
ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง	82
ตารางที่ 5.9 ผลการคำนวณรอบในการขนส่งของระบบหล่อในที่ (โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ → โครงการก่อสร้าง).....	83
ตารางที่ 5.10 ผลการคำนวณรอบในการขนส่งของระบบหล่อสำเร็จ (โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป → โครงการก่อสร้าง).....	83
ตารางที่ 5.11 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง (ต่อ 1 รอบ) (โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ →โครงการก่อสร้าง).....	84
ตารางที่ 5.12 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง (ต่อ 1 รอบ) (โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป → site).....	84
ตารางที่ 5.13 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง	85
ตารางที่ 5.14 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่งทั้งหมด	85
ตารางที่ 5.15 ผลรวมปริมาณ CO ₂ ที่สะสม (Embodied CO ₂) และ $E_{transport}$ ทั้งหมดในโครงการตัวอย่าง.....	86
ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่งของทั้ง 2 ระบบ.....	95

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 มูลค่าอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยรวมของไทย	1
รูปที่ 1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงราคาวัสดุก่อสร้างไทยในช่วงปี 2018-2021	2
รูปที่ 1.3 ขนาดตลาดและการเติบโตของอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูปในภูมิภาคต่าง ๆ	3
รูปที่ 2.1 จำนวนและอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก	9
รูปที่ 2.2 ผลของการพยากรณ์และความเป็นไปได้ของการพัฒนาทางเศรษฐกิจโลก โดยใช้ World311	11
รูปที่ 2.3 ตลาดอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูปในประเทศสหรัฐอเมริกา	13
รูปที่ 2.4 วัฏจักรชีวิตและต้นทุนของผลิตภัณฑ์	15
รูปที่ 2.5 แสดงวัฏจักรชีวิตของการก่อสร้างอาคาร	16
รูปที่ 2.6 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละช่วงของวัฏจักรชีวิตอาคาร	17
รูปที่ 2.7 Building layer diagram	17
รูปที่ 2.8 รูปแสดง single cash flow ที่มา: Stock Exchange of Thailand	21
รูปที่ 2.9 รูปแสดง annuity ที่มา: Stock Exchange of Thailand.....	21
รูปที่ 2.10 รูปแสดง perpetuity ที่มา: Stock Exchange of Thailand	21
รูปที่ 2.11 รูปแสดง uneven cash flow streams ที่มา: Stock Exchange of Thailand	21
รูปที่ 2.12 รูปแสดง การพิจารณากระแสเงินสด ที่มา: Stock Exchange of Thailand	22
รูปที่ 2.13 ก๊าซเรือนกระจกและค่าศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน.....	22
รูปที่ 2.14 ประเภทของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) ที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างอาคาร	24
รูปที่ 2.15 ปริมาณ Embodied และ Operational carbon ที่เกิดขึ้นในโครงการประเภทอาคาร .	24
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการประเมิน Embodied carbon สถานีรถไฟ Farringdon	26
รูปที่ 2.17 กระบวนการผลิต ขนส่ง ติดตั้ง คอนกรีตสำเร็จรูป.....	29
รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงการจำลองมอนติคาร์โล ของตัวแบบคณิตศาสตร์กรณีระบบมี 3 ตัวแปร.	34
รูปที่ 3.1 กรอบแนวคิดของการวิจัย	35

รูปที่ 3.2 การกำหนดขอบเขตของการวัดต้นทุนและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนในช่วงเตรียมการและช่วงก่อสร้าง	38
รูปที่ 4.1 อัตราคิดลดในอดีตตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014 - 2022	47
รูปที่ 4.2 Envelope method ของตัวแปร Minor repair ระบบหล่อในที่	54
รูปที่ 4.3 Envelope method ของตัวแปร Minor repair ระบบหล่อสำเร็จ	54
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของเวลา (ปี) ในการซ่อมแซมแบบ Minor repair ของระบบหล่อในที่	55
รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของต้นทุนในการซ่อมแซมแบบ Minor repair ของระบบหล่อในที่ (คิดเป็น % ของ Construction cost)	55
รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของเวลา (ปี) ในการซ่อมแบบ Minor repair ของระบบหล่อสำเร็จ	56
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของต้นทุนในการซ่อมแบบ Minor repair ของระบบหล่อสำเร็จ (คิดเป็น % ของ Construction Cost)	56
รูปที่ 4.8 แผนภาพเทอร์นาโดของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อในที่	65
รูปที่ 4.9 แผนภาพเทอร์นาโดของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อสำเร็จ	66
รูปที่ 4.10 ผลการสุ่มช่วงเวลาและต้นทุนของกิจกรรม Minor repair ของระบบหล่อในที่ โดยวิธี Envelope method	69
รูปที่ 4.11 ผลการสุ่มช่วงเวลาและต้นทุนของกิจกรรม Minor repair ของระบบหล่อสำเร็จ โดยวิธี Envelope method	69
รูปที่ 4.12 กราฟการกระจายตัวของค่าใช้จ่าย Minor repair cost ของระบบหล่อในที่	70
รูปที่ 4.13 กราฟการกระจายตัวของค่าใช้จ่าย Minor repair cost ของระบบหล่อสำเร็จ	71
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการตัวอย่างที่ 2 ระบบหล่อในที่	71
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงของค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการตัวอย่างที่ 2 ระบบหล่อสำเร็จ	72
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างเส้นทางการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการขนส่ง	79
รูปที่ 5.2 ปริมาณ CO ₂ ของกิจกรรมการขนส่งในระบบการก่อสร้างทั้ง 2 แบบ	87

รูปที่ 6.1 ผลการคำนวณ LCC และ $E_{transport}$ ของระบบหล่อในที่.....	89
รูปที่ 6.2 ผลการคำนวณ LCC และ $E_{transport}$ ของระบบหล่อสำเร็จ.....	89
รูปที่ 6.3 องค์กรประกอบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่ (50 ปี)	90
รูปที่ 6.4 องค์กรประกอบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จ (50 ปี)	91



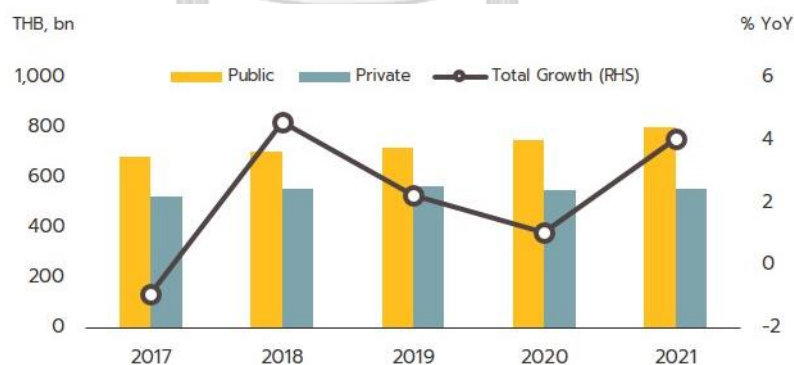
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ไม่ว่าจะเป็นทั้งในด้านเศรษฐกิจและด้านสังคม อุตสาหกรรมก่อสร้างได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณภาครัฐสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมประเทศ เช่น ถนน ระบบขนส่งสาธารณะ โรงพยาบาล สถานศึกษา เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนและสนับสนุนการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมอื่นๆ

ในปี พ.ศ. 2564 (ค.ศ. 2021) อุตสาหกรรมก่อสร้างมีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยมูลค่าการลงทุนภาคก่อสร้างโดยรวมที่ขยายตัว 4.1% เมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา หรือคิดเป็นมูลค่า 1,364.8 พันล้านบาท ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยแบ่งเป็นของภาครัฐ ที่มีมูลค่า 804.5 พันล้านบาท ขยายตัว 6.4% ปัจจัยสนับสนุนส่วนใหญ่มาจากการลงทุนก่อสร้างอย่างต่อเนื่องในโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ เช่น โครงการรถไฟฟ้าสายใหม่ 3 เส้นทาง คือ สีลม (ศูนย์วัฒนธรรมแห่งประเทศไทย-มีนบุรี) สีเหลือง (ลาดพร้าว-สำโรง) สีชมพู (แคราย-มีนบุรี) โครงการพัฒนาท่าเรืออุตสาหกรรม มาบตาพุด เฟส 3 ในพื้นที่ EEC และโดยส่วนของภาคเอกชน ที่มีมูลค่ามีมูลค่า 560.3 พันล้านบาท ขยายตัวเพียง 0.9% ผลจากการหดตัวของการก่อสร้างที่อยู่อาศัย



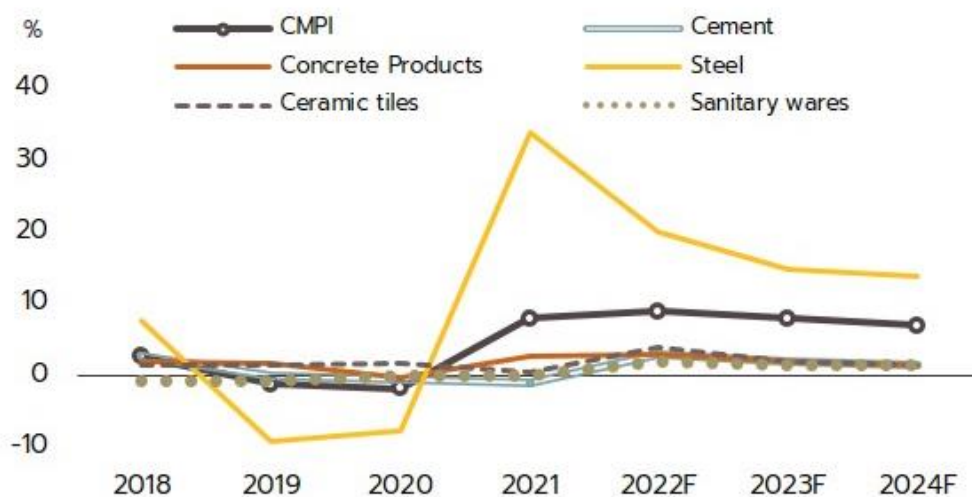
Construction	2017	2018	2019	2020	2021
Value (THB, bn)	1,212.4	1,268.3	1,297.3	1,311.5	1,364.8
Growth (% YoY)	-0.9	4.6	2.3	1.1	4.1

รูปที่ 1.1 มูลค่าอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยรวมของไทย

ที่มา : Krungsri Research (2022)

โดยแนวโน้มอุตสาหกรรมการก่อสร้างในอนาคตอันสั้นจะเติบโต เพราะเนื่องมาจากมีแรงขับเคลื่อนหลักจากการลงทุนโครงการขนาดใหญ่ของภาครัฐ โดยเฉพาะโครงการที่เกี่ยวข้องกับ EEC และโครงการขยายเส้นทางคมนาคมขนส่ง โดยเฉพาะทางรางและถนน รวมถึงการลงทุนโครงการก่อสร้างภาคเอกชน ทั้งในส่วนที่อยู่อาศัยและอสังหาริมทรัพย์เพื่อการพาณิชย์ที่มีแนวโน้มทยอยฟื้นตัวตามภาวะเศรษฐกิจ (Puttachard Lunkam, 2021) มูลค่าการก่อสร้างภาครัฐในปี 2021 จะอยู่ที่ราว 806,000 ล้านบาท (+6%YoY) สำหรับปี 2022 มูลค่าการก่อสร้างภาครัฐมีแนวโน้มขยายตัว 6%YoY จากความคืบหน้าของโครงการขนาดใหญ่ (Megaprojects) ที่ก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการเริ่มก่อสร้างโครงการใหม่ ๆ ทั้งโครงการขยายเส้นทางรถไฟฟ้า รถไฟทางคู่รถไฟความเร็วสูง โครงการขยายสนามบิน และโครงการทางถนน (กาญจนวิสุทธิ, 2021)

ในส่วนของการก่อสร้างงานอาคารพบว่า มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการในการสร้างอาคาร ไม่ว่าจะเป็นการก่อสร้างเพื่อพักอาศัย การก่อสร้างเพื่อเป็นสถานที่สาธารณูปโภค การก่อสร้างเพื่อเป็นอาคารเชิงพาณิชย์ รวมไปถึงการก่อสร้างเพื่อประเภทอื่นๆ (นิรุทธิ์ อมรคณารัตน์, 2019) ดังนั้นการขยายตัวทางการลงทุนภาคการก่อสร้าง ทั้งโครงสร้างพื้นฐานและโครงการอสังหาริมทรัพย์ ทำให้ความต้องการวัสดุก่อสร้างและราคาสูงขึ้น ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงราคาวัสดุก่อสร้างไทยในช่วงปี 2018-2021

ที่มา : Krungsri Research (2022)

จากรูปที่ 1.2 จะเห็นว่า ดัชนีวัสดุก่อสร้าง หรือ Construction Material Price Index (CMPI) ของประเทศไทย ในปี 2021 และ 2022 มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นจากช่วงปี 2019-2020 ซึ่งเป็นช่วงที่การก่อสร้างชะลอตัวจากผลของการระบาดของโรคโควิด 19 และจากการคาดการณ์ของ

Krungsri Research (2022) ดัชนีวัสดุก่อสร้าง (CMPI) ยังจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นในระดับค่อนข้างสูงในช่วงปี 2023-2024 (ประมาณ 6-7% ต่อปี) ส่วนคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3% ต่อปี (Puttachard Lunkam, 2021)

หากพิจารณาวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีตซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการก่อสร้าง พบว่าในตลาดโลก อุตสาหกรรม precast concrete ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกมีการเติบโตเร็วในระดับสูงและมีมูลค่าทางตลาดมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 ขนาดตลาดและการเติบโตของอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูปในภูมิภาคต่าง ๆ
ที่มา: Grand View Research (2020)

โดยจากข้อมูลของ Grand View Research (2020) พบว่าตลาดอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูปในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก มีอัตราการเติบโตประมาณ 6.6% ต่อปี เนื่องจากมีปัจจัยสนับสนุนที่ดี เช่น สภาพทางเศรษฐกิจที่มีการขยายตัวที่ดี เป็นต้น ไม่เพียงแค่งปัจจัยทางเศรษฐกิจเท่านั้นที่ส่งผลต่อการเติบโตของอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป แต่ยังมีปัจจัยสนับสนุนอื่น ๆ เช่น ความต้องการผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำงานได้รวดเร็ว เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คุ้มค่า และทันสมัย เป็นต้น เนื่องจากอุตสาหกรรมก่อสร้างในไทยมีการใช้แรงงานจำนวนมาก (Labor-intensive) แต่จากปัญหาขาดแคลนแรงงานก่อสร้างในช่วงที่หลายปีที่ผ่านมา ทำให้ธุรกิจก่อสร้างมองหาแนวทางการก่อสร้างที่ใช้แรงงานน้อยลง โดยใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีการก่อสร้างเข้ามาทดแทนการใช้แรงงานคน เป็นต้น (Grand View Research, 2020)

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีการระบุว่า การใช้ระบบคอนกรีตสำเร็จรูป นั้น จะช่วยทำให้ต้นทุนรวมของโครงการก่อสร้างลดลงโดยเฉลี่ย 15% ต่อโครงการ โดยเกิดจากการลดการใช้แรงงานประมาณ 50% และระยะเวลาก่อสร้างที่เร็วขึ้นประมาณ 30% เมื่อเทียบกับระบบหล่อในที่ (Cast-in place) หรือระบบก่อสร้างเดิม (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2020) ซึ่งตัวเลขนี้อาจเป็นแค่ค่าเฉลี่ยและค่าประมาณการ ซึ่งในการก่อสร้างอาคารหนึ่ง ๆ นั้นก็มีอัตราส่วนของการใช้ระบบหล่อสำเร็จต่อระบบหล่อในที่ (Precast/Cast-in Place) ที่แตกต่างกัน ค่าใช้จ่ายในการขนส่งและติดตั้งที่แตกต่างกัน ประกอบกับราคาวัสดุและค่าแรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งอาจนำไปสู่ค่าเฉลี่ยและค่าประมาณการที่แตกต่างกันในแต่ละโครงการและช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

นอกจากต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จแล้ว ผลกระทบของแต่ละกระบวนการต่อสิ่งแวดล้อมก็มีความสำคัญ เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมคอนกรีตและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน เนื่องจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary portland cement, OPC) หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Type I) ตามมาตรฐาน ASTM C150-07 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) ในปริมาณที่สูง โดยมีการศึกษาว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา มีค่าประมาณ 5% ถึง 7% ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทั้งหมดในโลกที่จากมนุษย์สร้างขึ้น โดยสาเหตุสำคัญของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา คือ การเผาหินปูนซึ่งเป็นหนึ่งในส่วนผสมที่สำคัญซึ่งนำไปสู่การก่อตัวและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และการใช้พลังงานสูงในระหว่างการผลิตรวมถึงการทำความร้อนวัตถุดิบภายในเตาเผาหมุนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,400 องศาเซลเซียส (Turner & Collins, 2013) ดังนั้นจึงมีการพยายามลดการปล่อยก๊าซมลพิษจากการก่อสร้าง โดยใช้วิธีต่าง ๆ เช่น การนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอื่น ๆ มาใช้เป็นวัสดุการก่อสร้าง การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานในขั้นตอนการก่อสร้าง หรือติดตั้งอุปกรณ์ลดสารมลพิษ เป็นต้น (เมธากุล มีธรรม, 2019)

นอกจากต้นทุนค่าใช้จ่ายและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ส่งผลกระทบต่อ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกแล้ว จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ยังพบว่าอุตสาหกรรมก่อสร้างมีส่วนในการสร้างมลพิษทางอากาศและสภาพแวดล้อม โดยรอบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2021)

ดังนั้นเพื่อให้การจัดการต้นทุนในการก่อสร้างให้เกิดความคุ้มค่าต่อเจ้าของโครงการ (Project owners) เจ้าของโครงการควรพิจารณาถึงต้นทุนและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสิ่งปลูกสร้างที่ใช้การก่อสร้างระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete) และระบบการก่อสร้างคอนกรีตแบบ

หล่อในที่ (Cast-in place) โดยรวมต้นทุนหลักที่สำคัญและต้นทุนแฝงต่าง ๆ ของการก่อสร้างทั้ง 2 ระบบ โดยเฉพาะระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete) รวมไปถึงวิเคราะห์ถึงปริมาณสารคาร์บอนที่ปล่อยออกมาตลอดตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของแต่ละรูปแบบของการก่อสร้าง โดยใช้การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของอาคาร (Life-cycle cost analysis, LCCA) ในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตั้งแต่การออกแบบ ก่อสร้าง และช่วงดำเนินงานหรือใช้งาน (Design-Construction-Operation) โดยในช่วงดำเนินการจะเป็นช่วงที่ต้องการตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าใช้จ่ายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยนำปัจจัยเสี่ยงของต้นทุนวัสดุในอนาคตมาประกอบการพยากรณ์ด้วย โดยในส่วนนี้ยังไม่มีเคยมีการศึกษาในบริบทของการเปรียบเทียบต้นทุนและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนตลอดอายุการใช้งาน

จากสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น งานวิจัยนี้ต้องการเสนอแนวทางการศึกษาโดยการเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life-Cycle Cost) และปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนของ (1) ระบบหล่อในที่ และ (2) ระบบหล่อสำเร็จ และเพื่อเปรียบเทียบหาปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนที่แตกต่างกันทั้ง 2 ระบบ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร การจำลองมอนติคาร์โล สำหรับต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน และวิธีสัมประสิทธิ์ (Coefficient method) สำหรับการประเมินปริมาณการปล่อยสารคาร์บอน ผลที่ได้จากการศึกษานี้ เจ้าของโครงการ (Developer) และลูกค้า (Clients) สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้รูปแบบและวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงในอนาคต และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนากระบวนการก่อสร้างให้เกิดประโยชน์ต่อเจ้าของโครงการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ ต่อลูกค้า (Clients) ของบริษัทพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ ซึ่งเป็นผู้ใช้งานโครงการ และต่อสังคมโดยรวมด้วย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life-Cycle Cost) และปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนของ (1) ระบบหล่อในที่ และ (2) ระบบหล่อสำเร็จ โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลต้นทุนในช่วงเตรียมการ ช่วงการก่อสร้าง และช่วงการใช้งานในอดีตถึงปัจจุบัน เพื่อการพยากรณ์ค่าใช้จ่ายตลอดช่วงการใช้งาน (O&M phase) และใช้วิธีสัมประสิทธิ์ (Coefficient method) ในการประเมินปริมาณการปล่อยสารคาร์บอน
2. เพื่อวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนที่แตกต่างกันของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ โดยใช้การ

วิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร (Sensitivity analysis) และการวิเคราะห์โดยวิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. การศึกษางานวิจัยเรื่องนี้จะเน้นเปรียบเทียบมูลค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและประเมินก๊าซเรือนกระจกเฉพาะ CO₂ ระหว่างงานระบบคอนกรีตหล่อในที่ และ ระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ โดยกำหนดช่วงเวลาของข้อมูลเป็น 3 ช่วง คือ
 - ช่วงเตรียมการก่อนการก่อสร้าง (Preparing phase)
 - ช่วงระหว่างการก่อสร้าง (Construction phase)
 - ช่วงดำเนินงานหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ (O&M phase)
2. ประเภทสิ่งปลูกสร้างที่ทำการศึกษา คือ อาคารชุดที่อยู่อาศัย (โครงการบ้านจัดสรร) ที่กำลังก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

เจ้าของโครงการนำผลการศึกษาที่ได้ไปประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้รูปแบบและวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงในอนาคตของตัวแปรด้านต้นทุนการก่อสร้างและบำรุงดูแลรักษา (ต้นทุนตลอดอายุการก่อสร้างและใช้งาน) กล่าวคือสามารถนำผลการศึกษาของงานวิจัยครั้งนี้ไปปรับใช้กับโครงการการก่อสร้างอื่น ๆ ในอนาคตได้ นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยส่งเสริมให้อุตสาหกรรมก่อสร้างคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดความคุ้มค่าในสภาวะการแข่งขันที่สูง รวมไปถึงการคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อให้สิ่งก่อสร้างที่เป็นที่พักอาศัย ซึ่งทั้งต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญในปัจจุบันสำหรับทุกอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมก่อสร้าง

1.5 นิยามศัพท์

1.5.1 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life-cycle cost)

ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน หรือ Life-cycle cost คือ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเศรษฐศาสตร์ที่พิจารณาค่าใช้จ่ายตั้งแต่เริ่มต้นออกแบบวางแผน ก่อสร้าง โครงการ การใช้งาน การบำรุงรักษา ตลอดจนการทำลาย เพื่อให้เจ้าของโครงการสามารถตัดสินใจในทางเลือกต่างๆ ในการออกแบบหรือพัฒนาปรับปรุงอาคารอาคาร

1.5.2 ระบบคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place concrete system)

ระบบคอนกรีตหล่อในที่ หรือ Cast-in place concrete system หมายถึงระบบการก่อสร้างที่ใช้คอนกรีตเสริมเหล็กโดยถูกหล่อขึ้นที่ ณ สถานที่ก่อสร้างในโครงการตัวอย่างนั้นๆ โดยจะทำการเทคอนกรีตลงในแม่พิมพ์ลงในสถานที่ก่อสร้างในโครงการตัวอย่างนั้นๆ ซึ่งระบบหล่อในที่เป็นระบบการก่อสร้างที่ใช้กันดั้งเดิมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

1.5.3 ระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete system)

ระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ หรือ Precast concrete system หมายถึงระบบการก่อสร้างที่ใช้คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกหล่อขึ้นก่อนในโรงงาน ให้มีรูปร่างตามที่เจ้าของต้องการก่อนที่จะถูกขนส่งและนำไปประกอบกันที่สถานที่ก่อสร้าง โดยคอนกรีตนั้นจะถูกเทลงในแม่พิมพ์ และเสริมความแข็งแรงด้านในด้วยเหล็กเส้น ดังนั้นลักษณะหรือรูปทรงของตัวคอนกรีตนั้น จะเป็นไปตามแบบที่เจ้าของต้องการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

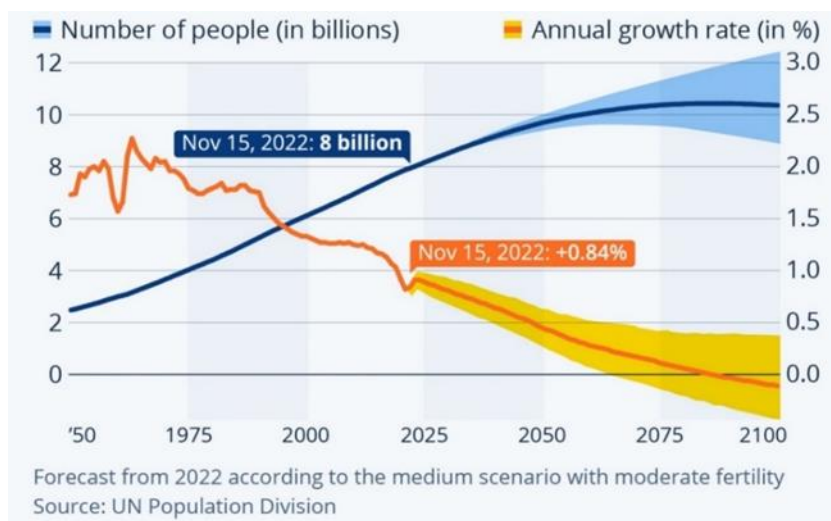
ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของอาคารและการประเมินปริมาณสารคาร์บอนที่ปล่อยออกมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ในกระบวนการก่อสร้างและใช้งานอาคาร รวมทั้งการศึกษาการพยากรณ์ราคาวัสดุก่อสร้าง เช่น คอนกรีต เป็นต้น และโมเดลการวัดปริมาณสารคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงข้อมูลต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางการศึกษาให้บรรลุได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยมีหัวข้อประกอบด้วย

- (1) บทบาทของอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมและความยั่งยืน
- (2) การก่อสร้างโดยใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete system)
- (3) วงจรชีวิตและสมรรถนะของโครงการ (Project life cycle and performance)
- (4) ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life - cycle cost)
- (5) เศรษฐศาสตร์งานอาคาร (Building economics)
- (6) วิธีการประเมินปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนไดออกไซด์
- (7) ตัวแบบการรวมต้นทุนรวมตลอดอายุโครงการและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกัน
- (8) องค์ประกอบและสมรรถนะของอาคารระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ
- (9) ความไม่แน่นอนและปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนรวมและสมรรถนะในช่วงการใช้งานของอาคาร
- (10) ตัวแบบการพยากรณ์ตัวแปรที่สำคัญ
- (11) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)
- (12) แบบจำลองมอนติคาร์โล

2.1 บทบาทของอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมและความยั่งยืน

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ไม่ว่าจะเป็นทั้งในด้านเศรษฐกิจและด้านสังคม ไม่ว่าจะเป็น ถนน ระบบขนส่งสาธารณะ โรงพยาบาล สถานศึกษา เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนและสนับสนุนการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น ธุรกิจการพัฒนอสังหาริมทรัพย์ ธุรกิจการเงิน และอุตสาหกรรมการท่องเที่ยว เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้เศรษฐกิจและสังคมมีการเติบโตขึ้นตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการพัฒนาต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาส่งผลต่อความต้องการของการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับตามความต้องการที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกในปัจจุบันที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของความต้องการที่อยู่อาศัยที่เพิ่มขึ้นตามมา (สมัชชาใหญ่แห่งสหประชาชาติ, 2022)



รูปที่ 2.1 จำนวนและอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก
ที่มา: Statista (2022)

การเติบโตพัฒนาทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากรได้นำไปสู่อัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่เป็นพื้นฐานในการดำรงชีวิต เช่น อาหาร ที่อยู่อาศัย เป็นต้น ทำให้เกิดการผลิตรัฐอุตสาหกรรม (Industrialization) เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์ที่สูงขึ้น และเพื่อการผลิตที่ประหยัดคุ่มค่า อย่างไรก็ตาม การผลิตรัฐอุตสาหกรรมและบริโภคนของประชากรโลกนอกจากจะส่งผลต่อการลดลงของทรัพยากรโลกแล้ว ยังส่งผลต่อปริมาณมลพิษและการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อนในปัจจุบัน

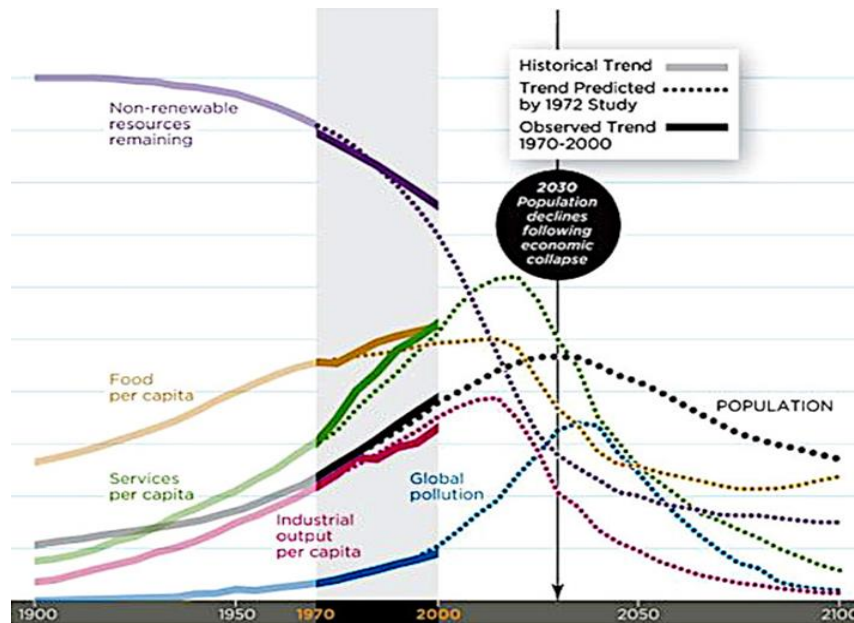
อย่างไรก็ตาม การเติบโตทางเศรษฐกิจที่มุ่งเน้นการวัดการเพิ่มขึ้นของการผลิตและบริโภคนั้นอาจมีขีดจำกัดตามปัจจัยของการผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยทรัพยากรธรรมชาติที่เป็นปัจจัยนำเข้าในการผลิตส่วนใหญ่ยังเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถเกิดขึ้นทดแทนได้ทันกับอัตราการใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวทางแนวคิดที่นำไปสู่การพัฒนาทฤษฎีที่เรียกว่า “Systems dynamics” ซึ่งเนื่องด้วยสถานะเศรษฐกิจที่มีการแข่งขันอย่างรุนแรง การขยายตัวทางการลงทุนภาคการก่อสร้างทั้งโครงสร้างพื้นฐานและโครงการอสังหาริมทรัพย์ ทำให้ความต้องการวัสดุก่อสร้างและราคาสูงขึ้น ซึ่ง

ส่งผลให้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่จำกัดต้องถูกนำไปแปรรูปเป็นวัสดุก่อสร้างหรือถูกนำไปใช้อุปโภคบริโภคมีมากขึ้น โดยไม่คำนึงถึงการมีอยู่จำกัดของทรัพยากรธรรมชาติ

อุตสาหกรรมก่อสร้างมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโลก เพราะปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างมีการใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญ โดยการผลิตซีเมนต์ก็เป็นหนึ่งในสาเหตุของภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Type I) ตามมาตรฐาน ASTM C150-07 คิดเป็นประมาณ 5% ถึง 7% ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทั้งหมดที่มนุษย์สร้างขึ้นทั่วโลก (Turner & Collins, 2013)

กระแสของแนวคิดของการพัฒนาความยั่งยืน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางมุมมองของการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด ที่เกิดจากความต้องการอย่างไม่มีที่สิ้นสุดของมนุษย์ ส่วนหนึ่งเกิดจากการเสนอทางแนวคิดของหนังสือชื่อ The Limits to Growth (LTG) ที่ได้กล่าวถึงความเป็นไปได้ของการเติบโตแบบทวีคูณของเศรษฐกิจและจำนวนประชากร ซึ่งศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการศึกษาที่ใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์หรือแบบจำลอง World3 เพื่อจำลองผลของการพัฒนาทางเศรษฐกิจที่เกิดจากตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเติบโตของเศรษฐกิจ เช่น จำนวนประชากรโลก ปริมาณทรัพยากรที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ ผลการผลิตของภาคอุตสาหกรรมต่อหัวประชากร (Industry output per capita) อาหารต่อหัวประชากร (Food per capita) ปริมาณมลพิษ เป็นต้น โดยตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

ในแบบจำลอง World3 เป็นการนำเสนอผลของการพยากรณ์และความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ของการพัฒนาที่เกิดจากมุ่งเน้นการเติบโตทางเศรษฐกิจที่เกิดจากการใช้ปัจจัยของการผลิตจากทรัพยากรที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ และการเพิ่มความต้องการจากการเติบโตของประชากรโลก ซึ่งจะนำไปสู่ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “overshoot and collapse” ซึ่งจากแบบจำลอง World3 ปรากฏการณ์นี้จะอยู่ในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 ถึงศตวรรษที่ 21 และหลังจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “overshoot and collapse” จะเกิดสถานะใหม่ที่เรียกว่า “stabilized stage หรือ stabilized world” หรือ “สถานะที่กลับมามีเสถียรภาพ” ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ผลของการพยากรณ์และความเป็นไปได้ของการพัฒนาทางเศรษฐกิจโลก โดยใช้ World3
ที่มา: (Paul Mobbs, 2021)

โดยวัตถุประสงค์ของหนังสือ The Limits to Growth (LTG) ก็เพื่อสร้างการรับรู้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับขีดจำกัดของระบบเศรษฐกิจโลกอุตสาหกรรมของเรา และข้อจำกัดที่เกิดขึ้นกับจำนวนและกิจกรรมทางเศรษฐกิจของมนุษย์ อีกทั้งยังระบุและศึกษองค์ประกอบที่สำคัญและปฏิสัมพันธ์ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะยาวของการพัฒนาทางเศรษฐกิจโดยพึ่งการผลิตเชิงอุตสาหกรรมและเพื่อเป็นสัญญาณเตือนถึงผลลัพธ์ของนโยบายทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมในประเทศต่าง ๆ ในปัจจุบัน โดยมุ่งหวังที่จะให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางนโยบายที่ส่งผลต่อการพัฒนายั่งยืนมากยิ่งขึ้น

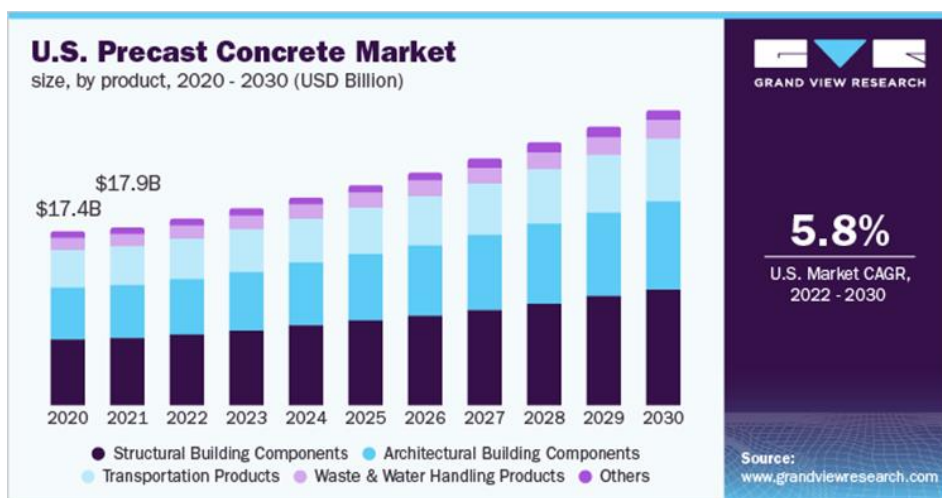
2.2 การก่อสร้างโดยใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete system)

เนื่องด้วยอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในอนาคต เนื่องจากที่ผ่านมา อุตสาหกรรมก่อสร้างในไทยมีการใช้แรงงานจำนวนมาก (Labor-intensive) แต่จากปัญหาขาดแคลนแรงงานก่อสร้างในช่วงหลัง ทำให้ธุรกิจก่อสร้างอาจจะต้องมองหาแนวทางการก่อสร้าง ที่ใช้แรงงานน้อยลงโดยใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีการก่อสร้างเข้ามาทดแทน เทคโนโลยีที่น่าจะช่วยแก้ปัญหาข้างต้นได้คือ การก่อสร้างแบบใช้วัสดุสำเร็จรูปยกมาติดตั้ง (Pre-fabrication or Pre-cast Construction) เช่น การก่อสร้างโดยใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete system) เป็นต้น

คอนกรีตสำเร็จรูป หรือ Precast Concrete หมายถึง คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกหล่อขึ้นก่อน ในโรงงาน ให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ ก่อนที่จะถูกขนส่งและนำไปประกอบกันที่สถานที่ก่อสร้าง โดย คอนกรีตนั้นจะถูกเทลงในแม่พิมพ์ และเสริมความแข็งแรงด้านในด้วยเหล็กเส้น ดังนั้นลักษณะหรือ รูปทรงของตัวคอนกรีตนั้น จะเป็นไปตามแบบที่เจ้าของต้องการ

โดยวิธีการก่อสร้างนี้จะทำให้ต้นทุนรวมของโครงการก่อสร้างลดลงโดยเฉลี่ย 15% ต่อ โครงการ จากการลดการใช้แรงงานประมาณ 50% และระยะเวลาก่อสร้างที่เร็วขึ้นประมาณ 30% เพราะการทำ precast concrete ในปัจจุบันนั้นมีการใช้ ระบบคอมพิวเตอร์ทำให้มีคุณภาพและ สามารถปรับการผลิตให้ผลิตสินค้าตามแผนงานของลูกค้าแต่ละเจ้าได้ทันที โดยการนำ Software ต่างๆ ที่ทำงานเชื่อมโยงกันและบริหารงานก่อสร้างบนระบบ Building Information Modeling หรือ BIM ตั้งแต่การออกแบบ ควบคุมการผลิต การทำงานหน้างาน และนั่นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ วิธีการ ก่อสร้างนี้ลดต้นทุนและเวลารวมถึงแรงงานในการก่อสร้าง

ในอุตสาหกรรม precast concrete ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกถูกคาดว่าจะจะเป็นตลาดระดับ ภูมิภาคที่เติบโตเร็วที่สุดด้วยอัตราการเติบโตต่อปีแบบทบต้นหรือ CAGR (compound annual growth rate) อยู่ที่ 6.6% ในช่วงระยะเวลาคาดการณ์ เนื่องจากสภาพทางเศรษฐกิจที่มีโดดเด่นเป็น อย่างมากและเป็นสัญญาณที่ดี ดังนั้นด้วยอัตราการเติบโตที่เพิ่มขึ้นของภาคอุตสาหกรรมจะส่งผลให้มี แนวโน้มที่จะเพิ่มความต้องการผลิตภัณฑ์ในสหรัฐอเมริกาในช่วงเวลาที่คาดการณ์ไว้ ไม่เพียงแต่ สภาพทางเศรษฐกิจที่มีโดดเด่นเป็นอย่างมากและเป็นสัญญาณที่ดีเท่านั้น แต่ยังมีความต้องการ ผลิตภัณฑ์คาดว่าจะเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแนวโน้มของผู้รับเหมาก่อสร้างและลูกค้าที่ต้องการ โซลูชันการก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คุ่มค่า และทันสมัยอีกด้วย ซึ่งในมุมมองอุตสาหกรรม คอนกรีตสำเร็จรูปของโลกนั้น ขนาดตลาดคอนกรีตสำเร็จรูปทั่วโลกอยู่ที่ประมาณ 96.3 พันล้าน เหรียญสหรัฐ ในปี 2564 และคาดว่าจะมีอัตราการเติบโตต่อปี (CAGR) ที่ 5.5% ในช่วงที่คาดการณ์ไว้ เพราะมีการคาดว่าจะได้รับแรงหนุนจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมก่อสร้างในภูมิภาคหลัก ๆ เนื่องจากการลงทุนที่เพิ่มขึ้นในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตลาดอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูปในประเทศสหรัฐอเมริกา
ที่มา: Grand View research (2020)

ปัจจุบันการก่อสร้างรูปแบบนี้นิยมใช้ใน งานก่อสร้างเอกชนที่เป็นอาคารที่พักอาศัยแนวราบ มูลค่าไม่เกิน 10 ล้านบาท ที่ในปี 2563 มีมูลค่าการก่อสร้างประมาณ 1.39 แสนล้านบาท ซึ่งคิดเป็น 11% ของมูลค่าการก่อสร้างทั้งหมด และมีสัดส่วนโครงการที่ใช้งาน Pre-cast ต่อจำนวนโครงการก่อสร้างที่อยู่อาศัยแนวราบเอกชนทั้งหมด อยู่ที่ประมาณ 48% ในปี 2563 ศูนย์วิจัยกสิกรไทยมองว่า สัดส่วนงานก่อสร้างที่จะใช้งานก่อสร้างรูปแบบ Precast ในกลุ่มอาคารที่พักอาศัยแนวราบของเอกชน น่าจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยปีละ 3% จนถึงปี 2568 ซึ่งเป็นผลมาจากแรงงานก่อสร้างที่หายากขึ้นและมีค่าแรงที่สูงขึ้นเป็นหลัก นอกจากนี้ Pre-cast จะช่วยควบคุมต้นทุนทางด้านการก่อสร้างแล้ว การก่อสร้างรูปแบบนี้อาจจะตอบโจทย์ความต้องการในอนาคตด้วย เนื่องจากในปี 2564 ประเทศไทยคาดว่าจะถูกจัดเป็นสังคมผู้สูงอายุโดยสมบูรณ์ ทำให้แนวโน้มรูปแบบที่พักอาศัยอาจจะต้องเปลี่ยนไปเพื่อรองรับความต้องการของสังคมวัยชรา (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2020)

ในปัจจุบัน โครงสร้าง Precast concrete โดยทั่วไป มีราคาแพงกว่าโครงสร้างหล่อในที่ หากเปรียบเทียบกับด้วยต้นทุนทางตรง ทั้งค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าเครื่องจักร แต่ด้วยการผลิตในปริมาณมาก ความแม่นยำและรวดเร็วจากระบบการทำงานทำให้ประหยัดต้นทุนแฝงอื่น ๆ (Hidden costs) ไม่ว่าจะเป็นในแง่ของการลดต้นทุนที่เกิดจากเศษวัสดุ (Material waste) การแก้ไขงาน (Cost of correcting defects) ตลอดจนดอกเบี้ยเงินกู้ (Financing cost) และการก่อสร้างที่เร็วขึ้นยังส่งผลต่อความสามารถในการรับรู้รายได้จากการขายที่เร็วขึ้นอีกด้วย เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมทั้งหมด จึงเกิดมโนทัศน์ว่า Precast concrete น่าจะมีความคุ้มค่าที่มากกว่าการก่อสร้างด้วยระบบหล่อในที่

อย่างไรก็ตามผู้ซื้อสังหาริมทรัพย์ยังมีข้อกังวลในระบบและวิธีการก่อสร้างใหม่ ๆ เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงการใช้งาน เช่น ปัญหาการแตกร้าว ร้าวซึม เป็นต้น (บ้านและสวน, 2018)

ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete) ในท้องตลาดประกอบไปด้วย ผนัง พื้น คาน บันได ที่ใช้สำหรับการก่อสร้างอาคารเพื่ออยู่อาศัย อาคารสำนักงาน โรงงาน และคลังสินค้า ในปัจจุบันผู้พัฒนาอสังหาริมทรัพย์ และผู้รับเหมาก่อสร้างซึ่งเป็นกลุ่มลูกค้าในการใช้วัสดุก่อสร้าง จะพิจารณาต้นทุนรวมของการเลือกใช้ Precast Concrete เปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น นอกจากการเปรียบเทียบต้นทุนแล้ว เหตุผลที่ภาคอุตสาหกรรมอสังหาริมทรัพย์มีการเลือกใช้ Precast Concrete มากขึ้น ก็เนื่องจากความรวดเร็วในการก่อสร้าง ลดขั้นตอนการทำงานและจำนวนแรงงานที่ใช้ (ซีแพนเนล, 2021) ส่งผลให้มีการประเมินว่า ต้นทุนรวมของโครงการที่ใช้ Precast Concrete ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 15 แบ่งเป็นการลดลงส่วนของต้นทุนแรงงานประมาณร้อยละ 50 และการลดลงของดอกเบี้ยจ่ายให้ธนาคาร (กรณีกู้ยืมเงินจากธนาคาร) จากการที่สามารถลดระยะเวลาก่อสร้างได้อย่างน้อยประมาณร้อยละ 30 โดยศูนย์วิจัยกสิกรยังคาดการณ์ว่า อสังหาริมทรัพย์เพื่ออยู่อาศัยแนวราบที่ก่อสร้างโดย Precast Concrete ในอนาคตยังมีอัตราการเติบโตอย่างต่อเนื่อง คิดเป็นค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3 ต่อปี (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2020)

คอนกรีตสำเร็จรูปมีข้อดีหลายประการ แต่คอนกรีตสำเร็จรูปนั้นก็ยังมีข้อจำกัดในการก่อสร้างและใช้งาน ตัวอย่างของข้อจำกัดของคอนกรีตสำเร็จรูป ประกอบด้วย

1. ค่าใช้จ่ายล่วงหน้าที่สูง (high upfront costs)

การใช้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นจะมีต้นทุนล่วงหน้าในการผลิตที่สูงกว่าแผ่นอิฐหรือหิน ดังนั้น ค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นจากการเลือกใช้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนี้อาจทำให้เจ้าของโครงการรู้สึกไม่พอใจกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเจ้าของโครงการเคยชินกับวัสดุก่อสร้างราคาถูก

2. ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

เนื่องด้วยการผลิตแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นต้องผลิตจากโรงงาน ถ้าหากพื้นที่โครงการก่อสร้างตั้งอยู่ห่างไกลจากโรงงานผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป การขนส่งอาจใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูง

3. มีรายละเอียดในการติดตั้งในโครงการค่อนข้างเยอะและต้องทำอย่างระมัดระวัง

เนื่องด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น แผ่นคอนกรีตจะมีรูปร่างเฉพาะเจาะจงในการใช้งาน ดังนั้น การที่จะนำไปติดตั้งตามส่วนต่างๆ จำเป็นอย่างมากที่ต้องสื่อสารที่ดี เช่น การสื่อสารกับคนขับเครนและคนงานส่วนอื่นๆ ให้ดี เพราะต้องยกแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ ในโครงการก่อสร้าง เป็นต้น

4. คอนกรีตสำเร็จรูปสามารถแก้ไขได้ยากเมื่อสร้างเสร็จแล้ว

สำหรับการใช้คอนกรีตสำเร็จรูป เมื่อติดตั้งแล้วเสร็จการเปลี่ยนแปลงแก้ไขอาจทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีการเรียงซ้อนกันของแผ่น การเปลี่ยนแปลงใด ๆ อาจหมายความว่าต้องทำการเปลี่ยนแปลงทั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น

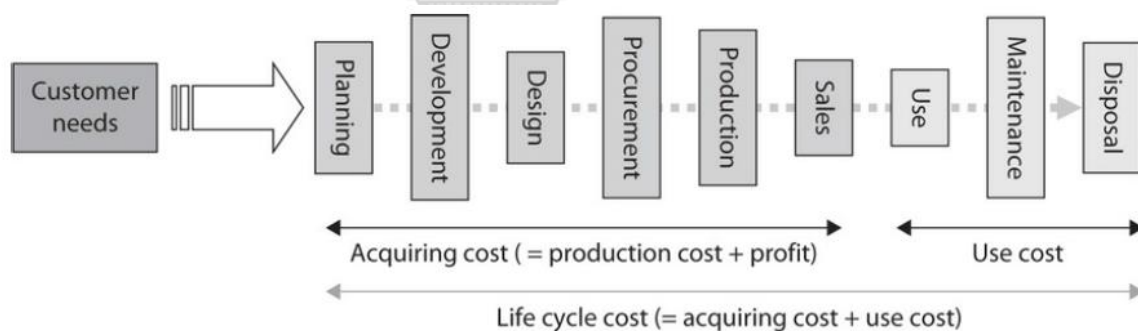
5. การติดตั้งที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดปัญหาในช่วงการใช้งานได้

การติดตั้งคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นต้องติดตั้งโดยผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งต้องมีความรู้ทางวิศวกรรมในการเชื่อมต่อที่สำคัญ และถ้าการติดตั้งไม่ถูกต้องอาจทำให้เกิดรอยเชื่อมต่อที่ผิดพลาดและทำให้แผ่นคอนกรีตรับแรงได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งมักนำไปสู่ปัญหาเกี่ยวกับความเสียหายอื่นๆ

2.3 วัฏจักรชีวิตและสมรรถนะของโครงการ (Project life cycle and performance)

ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life cycle cost) คือ ต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นตั้งแต่การวางแผนและพัฒนา การออกแบบ การจัดหา การผลิตและขาย การใช้งาน การบำรุงดูแลรักษา การกำจัดและการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งต้นทุนรวมต่าง ๆ เหล่านี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น ต้นทุนในการจัดหาและให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ (Acquiring cost) และต้นทุนที่เกิดจากการใช้งาน (Use cost) ดังแสดงในรูปที่

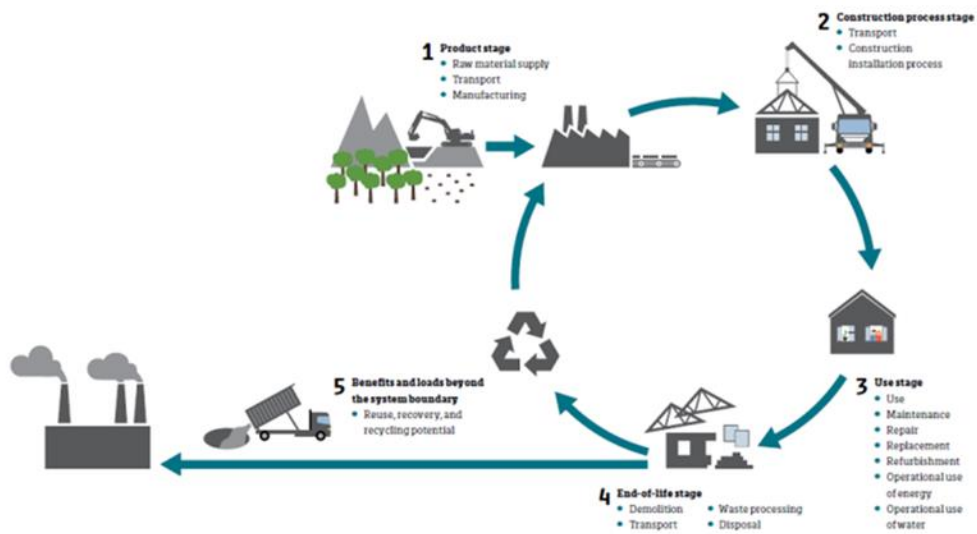
2.4



รูปที่ 2.4 วัฏจักรชีวิตและต้นทุนของผลิตภัณฑ์

ที่มา: (Onizuka, 2015)

ซึ่งในการก่อสร้างก็เช่นเดียวกัน ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานนั้นเกิดขึ้นตั้งแต่การจัดการวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น การระเบิดหินปูนเพื่อผลิตซีเมนต์ เป็นต้น การขนส่งวัสดุก่อสร้างจากโรงงานไปยังโครงการที่กำลังก่อสร้าง การขนย้ายวัสดุก่อสร้างในโครงการ การใช้งาน การรื้อย้ายหรือรื้อทำลาย และการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

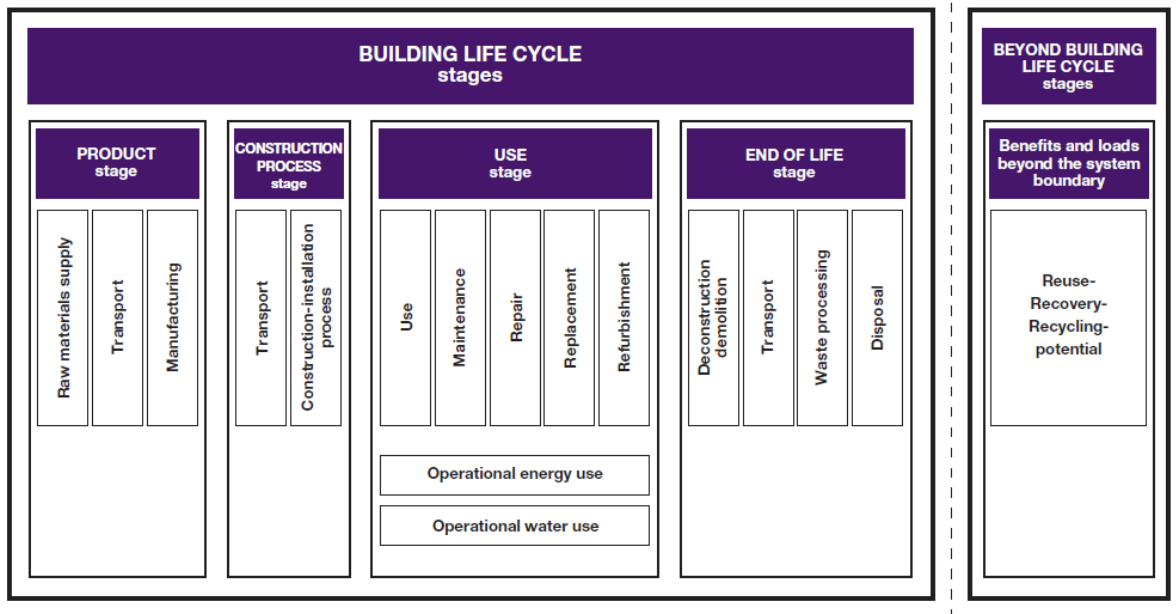


รูปที่ 2.5 แสดงวัฏจักรชีวิตของการก่อสร้างอาคาร

ที่มา : European Insulation Manufacturing Association (2017)

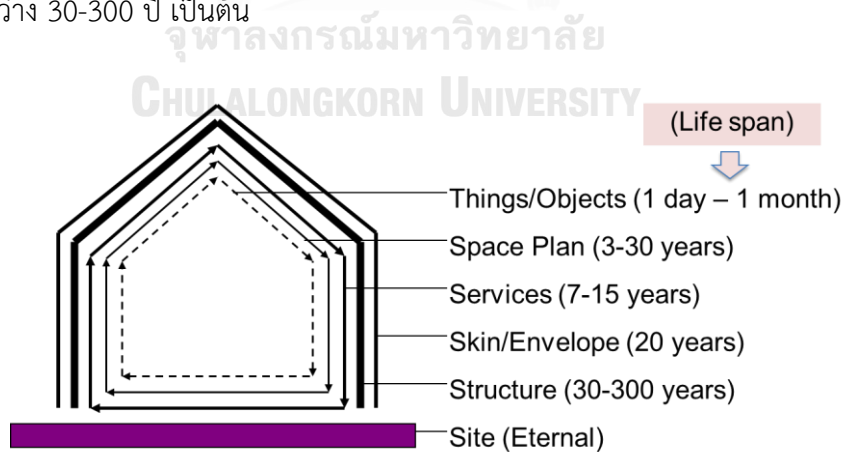
โดยในแต่ละกระบวนการและกิจกรรมที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างก็ยังมีสร้างมลพิษอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นต้น ซึ่งจากรายงานเรื่อง Methodology to Calculate Embodied Carbon of Materials (Royal Institution of Chartered Surveyors, 2012) ได้กล่าวไว้ว่า การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น เกิดขึ้นตลอดในช่วงวงจรชีวิตของอาคาร โดยแบ่งช่วงของวงจรชีวิตของอาคารออกเป็น 5 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ได้แก่

- ช่วงการผลิตวัสดุก่อสร้าง (Production stage)
- ช่วงการก่อสร้าง (Construction stage)
- ช่วงการใช้งาน (Use stage)
- ช่วงการรื้อทำลาย (End of life stage)
- ช่วงนอกเหนืออายุการใช้งานอาคาร (Beyond building life cycle stages)



รูปที่ 2.6 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละช่วงของวัฏจักรชีวิตอาคาร
ที่มา: Methodology to calculate embodied carbon of materials (2012)

ในช่วงการใช้งาน (Use stage) แต่ละองค์ประกอบอาคารอาจมีระยะเวลาในการใช้งานที่แตกต่างกัน และวัสดุที่เลือกใช้ในแต่ละองค์อาคารก็อาจมีระยะเวลาการใช้งานที่ต่างกันด้วย โดยอายุการใช้งานของแต่ละองค์ประกอบอาคารสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงแผนภาพทางแนวคิดของแต่ละชั้นขององค์ประกอบอาคารและอายุโดยเฉลี่ย เช่น กรณีของโครงสร้างอาจมีอายุการใช้งานระหว่าง 30-300 ปี เป็นต้น



รูปที่ 2.7 Building layer diagram
ที่มา: ดัดแปลงจาก Duffy and Henney (1989)

2.4 ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life-cycle cost)

การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life-cycle cost หรือ LCC) เกิดขึ้นจากกระทรวงกลาโหมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US-Department of Defense, DoD) ที่ได้คิดค้นหาแนวทางการประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต เพื่อใช้ในการประเมินต้นทุนในกิจกรรมทางการทหาร ซึ่งในขณะนั้นประสบปัญหาเรื่องความสูญเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมาก และความคุ้มค่าในการปฏิบัติการและสนับสนุนทางทหาร เช่น การจัดซื้ออาวุธและยุทโธปกรณ์ต่าง ๆ ค่าใช้จ่ายในการขนส่งอาวุธและยุทโธปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น โดยแนวคิด LCC ที่เกิดขึ้นในตอนนั้นก็เริ่มขึ้นในแผนการที่มีชื่อเรียกว่า “Integrated Logistics Support (ILS)” โดยแผน ILS นี้จะทำการประเมินอุปกรณ์ที่จำเป็นทั้งหมด (โดยเฉพาะการซื้ออาวุธ) ที่กองทัพต้องการใช้ว่ามีอะไรบ้าง และจะเลือกอุปกรณ์ที่จำเป็นทั้งหมดอย่างไรเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในราคาที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่นอกเหนือค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ เช่น ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งาน เป็นต้น (NATO, 2009) ต่อมาในช่วงปี 1980-1989 นั้นก็ได้มีการนำแนวคิดของการประเมินค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนตลอดช่วงการใช้งานนี้ไปใช้ในภาคการอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน โรงไฟฟ้า อุตสาหกรรมการผลิตเชื้อเพลิงและสารเคมีและการรถไฟ เป็นต้น จนกระทั่งปัจจุบันนี้ก็ได้มีการนำเอา LCC มาใช้อย่างแพร่หลายในเกือบทุกภาคส่วน

ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life-cycle cost, LCC) เป็นการคำนวณมูลค่าปัจจุบัน (Present value) ของต้นทุนตลอดช่วงอายุของสินทรัพย์ ตั้งแต่การก่อสร้างจนถึงการรื้อทำลาย โดยการคำนวณนี้จะใช้เป็นตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการประเมินความเหมาะสมของโครงการสำหรับค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ซึ่งในกระบวนการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกันจะต้องแปลงให้เป็นมูลค่าเงินให้เป็นปัจจุบัน (Present value) ดังสมการ 2.1 (นิรุทธิ์ อมรคณารัตน์, 2019)

$$LCC_j = (l_{0_j} + R_{p_j} - R_{s_j}) + O_{p_j} \quad (2.1)$$

โดยที่ LCC_j คือ มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายตลอดวัฏจักรชีวิตของวิธีการก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตแบบ j โดย $j \in \{c, f\}$ คือ ตัวเลือกของวิธีการใช้คอนกรีตในการก่อสร้างของโครงการ แบ่งเป็น

- c คือ วิธีการก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตแบบหล่อในที่
- f คือ วิธีการก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตแบบใช้คอนกรีตสำเร็จรูป

l_{0_j} คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นของวิธีการก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตแบบ j

- O_{p_j} คือ มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายดำเนินการและค่าซ่อมแซมของวิธีการก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตแบบ j
- R_{p_j} คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนการเปลี่ยนของวิธีการก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตแบบ j
- R_{s_j} คือ มูลค่าปัจจุบันของมูลค่าขายต่อมูลค่าซากของวิธีการก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตแบบ j

2.5 เศรษฐศาสตร์งานอาคาร (Building economics)

2.5.1 มูลค่าของเงินตามเวลา (Time value of money)

มูลค่าของเงินตามเวลาเป็นแนวคิดเกี่ยวกับการเงินที่สำคัญ เนื่องจากมูลค่าของเงินที่ได้รับในวันนี้มักจะมีมูลค่าน้อยกว่าเงินที่จะได้รับในอนาคต เพราะอำนาจในการซื้อ (Purchasing power) ของเงินจำนวนเดียวกันที่ลดลงเนื่องจากเงินเฟ้อ (Inflation) อีกทั้งเงินที่ได้รับในวันนี้ยังสามารถสร้างผลตอบแทนได้จากลงทุน (อัจฉรา โยมสินธุ์, 2012) ตัวแปรสำคัญในการคำนวณมูลค่าเงินปัจจุบันเป็นดังนี้

$$PV = \frac{FV_t}{(1+i)^t} \quad (2.1)$$

- โดย PV คือ มูลค่าเงินปัจจุบัน (Present value)
- FV คือ มูลค่าเงินอนาคต ณ ปีที่ t
- i คือ อัตราคิดลด (Discount rate)

โดยในกรณีที่มีกระแสเงินสดเกิดขึ้นหลายปี มูลค่าเงินปัจจุบันสามารถคำนวณได้โดยรวมมูลค่าเงินปัจจุบันของเงินทั้งหมดในอนาคต ซึ่งมีสมการเป็น

$$PV = \sum_{t=0}^{t=T} \frac{FV_t}{(1+i)^t} \quad (2.2)$$

ส่วนการคำนวณเงินเท่ากันแบบสม่ำเสมอตามช่วงเวลา (Uniform series formulas) ที่มีค่าเท่ากับ A (Annuity) และมีระยะเวลา n ปี มีสมการเป็นดังนี้

$$PV = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (2.3)$$

ในการทำงานเดียวกันถ้าต้องการหามูลค่าเงินในอนาคตโดยมีจำนวนเงินที่เท่ากันสม่ำเสมอ สามารถทำได้ โดยสมการ 2.4

$$FV = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \quad (2.4)$$

จากสมการมูลค่าเงินตามเวลาสมการที่ (2.2) ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (2.5)

$$LCC = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (2.5)$$

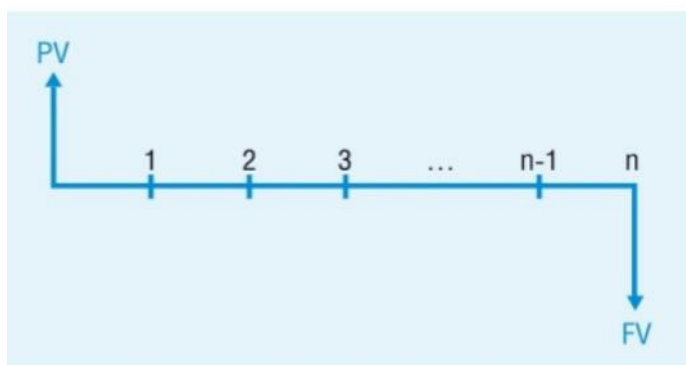
โดย LCC คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต

C_t คือ ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ณ ปีที่ t

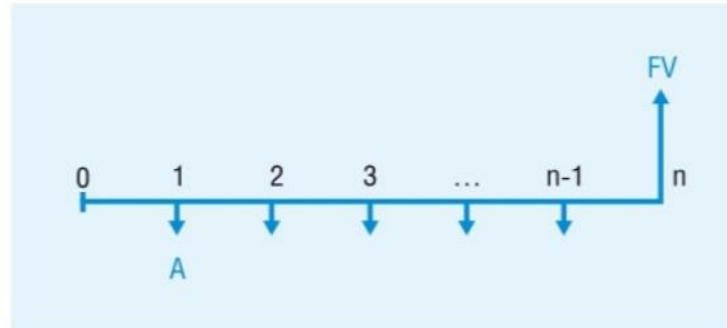
T คือ ระยะเวลาของวัฏจักรชีวิต

2.5.2 กราฟกระแสเงินสด (Cash flow diagram)

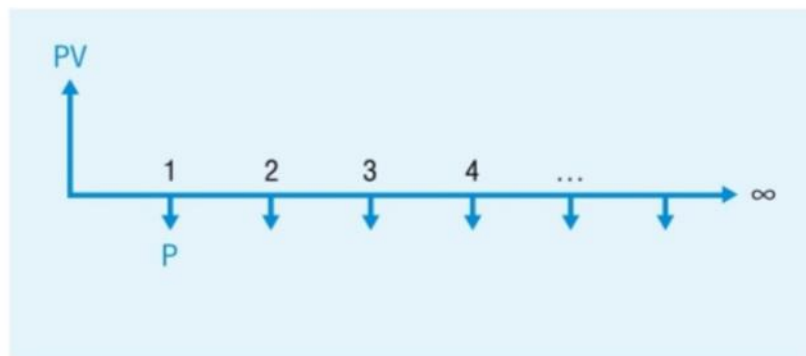
กราฟกระแสเงินสด (Cash flow diagram) คือ การเขียนกระแสเงินสดที่เข้ามาและออกไปในแต่ละช่วงเวลา (Period) ให้เข้าใจง่ายขึ้น รวมทั้งเขียนดอกเบี้ยหรือผลตอบแทนที่ได้รับจากการลงทุน ซึ่งกระแสเงินสดนั้นมีได้หลากหลายรูปแบบ เช่น กระแสเงินสดเงินต้นครั้งเดียว (Single cash flow) กระแสเงินสดลงเงินงวด (Annuity) กระแสเงินสดลงเงินงวดไปมีที่สิ้นสุด (Perpetuity) กระแสเงินสดของเงินงวดที่ไม่เท่ากัน (Uneven cash flow streams) โดยการพิจารณามูลค่ากระแสเงินสดในรูปแบบมูลค่าเงินในปัจจุบัน (Present value) หรือ มูลค่าเงินในอนาคต (Future value) จะใช้สูตร Time value of money ที่กล่าวไปก่อนหน้านั้นในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 – 2.11



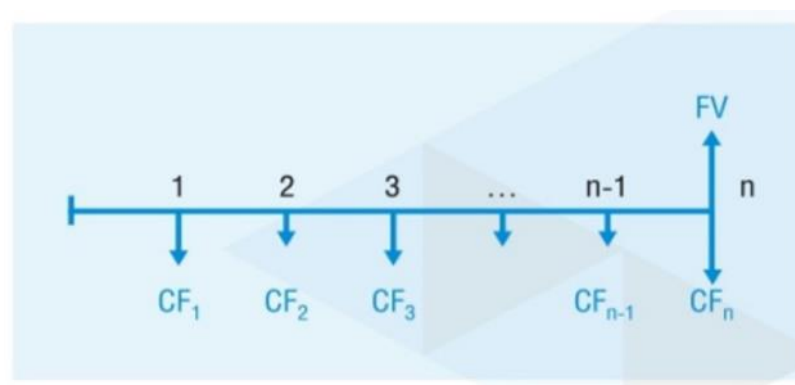
รูปที่ 2.8 รูปแสดง single cash flow ที่มา: Stock Exchange of Thailand



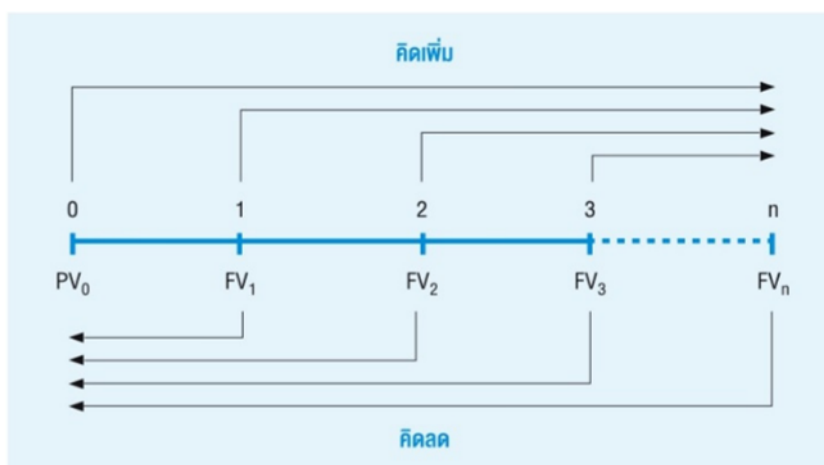
รูปที่ 2.9 รูปแสดง annuity ที่มา: Stock Exchange of Thailand



รูปที่ 2.10 รูปแสดง perpetuity ที่มา: Stock Exchange of Thailand



รูปที่ 2.11 รูปแสดง uneven cash flow streams ที่มา: Stock Exchange of Thailand



รูปที่ 2.12 รูปแสดง การพิจารณากระแสเงินสด ที่มา: Stock Exchange of Thailand

2.6 วิธีการประเมินปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนไดออกไซด์

ปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming) ได้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (Climate change) ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น โดยมีสาเหตุหลักมาจากการการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นจากการใช้พลังงาน การเกษตร การพัฒนา และขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม การขนส่งรวมถึงการตัดไม้ทำลายป่าและการทำลายสิ่งแวดล้อมในรูปแบบอื่น ๆ ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะโลกร้อน (พรพิมล สุตจันลิก, 2563) ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ไม่ได้มีแค่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ยังมีก๊าซอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.13

ก๊าซเรือนกระจก	GWP ₁₀₀ (CO ₂ -equivalent)
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	1
ก๊าซมีเทน (CH ₄)	25
ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O)	298
กลุ่มก๊าซไฮโดรฟลูออไรด์คาร์บอน (HFCS)	675 - 14,800
กลุ่มก๊าซเพอร์ฟลูออไรด์คาร์บอน (PFC)	7,390 - 12,200
ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF ₆)	22,800

รูปที่ 2.13 ก๊าซเรือนกระจกและค่าศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน

ที่มา : องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2011)

หมายเหตุ : GWP₁₀₀ = a 100-year Global Warming Potential (GWP)

ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปี พ.ศ.2554 ประมาณ 305.52 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Tons of carbon dioxide equivalent: tCO₂e) ในจำนวนนี้เกิดจากภาคเศรษฐกิจที่เกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้า การขนส่ง และการก่อสร้าง รวมเป็นประมาณ 222.94 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า หรือคิดเป็นร้อยละ 72.97 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของประเทศ (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2015) หากคิดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคน พบว่าประเทศไทยมีค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคนประมาณ 3.87 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคนใน 1 ปี (Policy, 2015)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่าการประเมินปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint) มีการแบ่งขอบเขตในการประเมินออกเป็น 3 ขอบเขต ได้แก่

- ขอบเขตที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง
- ขอบเขตที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน
- ขอบเขตที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ

ขั้นตอนการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 5 ขั้นตอน (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2554) ได้แก่

- การกำหนดขอบเขตขององค์กร (Organization boundary)
- การกำหนดขอบเขตของกระบวนการ/กิจกรรมที่เกิดขึ้นในองค์กร (Operational boundaries)
- การระบุแหล่งที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก และทำการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์
- การจัดทำบัญชีรายการก๊าซเรือนกระจก รวบรวมข้อมูลการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมทั้ง 3 ประเภท และสรุปผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
- การประเมินและจัดการความไม่แน่นอน (Uncertainly)

สำหรับประเภทของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างอาคาร แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.14 คือ

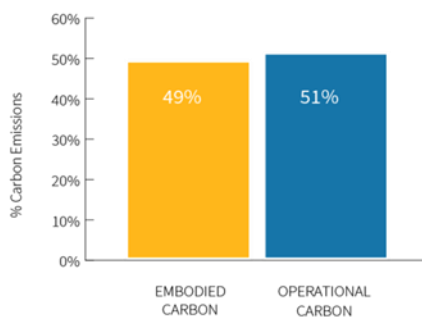
- Embodied carbon หมายถึง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกี่ยวกับการผลิตวัสดุก่อสร้างและกระบวนการก่อสร้าง (Preconstruction and construction phase)

- Operational carbon หมายถึง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้พลังงานของอาคารซึ่งเกิดในช่วงการดำเนินงานและบำรุงรักษา (O&M phase)



รูปที่ 2.14 ประเภทของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างอาคาร
ที่มา : CarbonCure (2020)

ที่ผ่านมา มีการศึกษา สัดส่วนของปริมาณ Embodied carbon และ operational carbon ที่เกิดขึ้นในการพัฒนาโครงการ ตัวอย่างเช่น การศึกษาของ CarbonCure (2022) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งพบว่าสัดส่วนของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกี่ยวกับการผลิตวัสดุ ก่อสร้างและกระบวนการก่อสร้าง (Embodied carbon) และ operational carbon ที่เกิดขึ้นในการพัฒนาโครงการประเภทอาคาร มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 49% สำหรับ Embodied carbon และ 51% สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้พลังงานของอาคารซึ่งเกิดในช่วงการดำเนินงานและบำรุงรักษา ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (CARBON CURE, 2020)



รูปที่ 2.15 ปริมาณ Embodied และ Operational carbon ที่เกิดขึ้นในโครงการประเภทอาคาร
ที่มา : CarbonCure (2020)

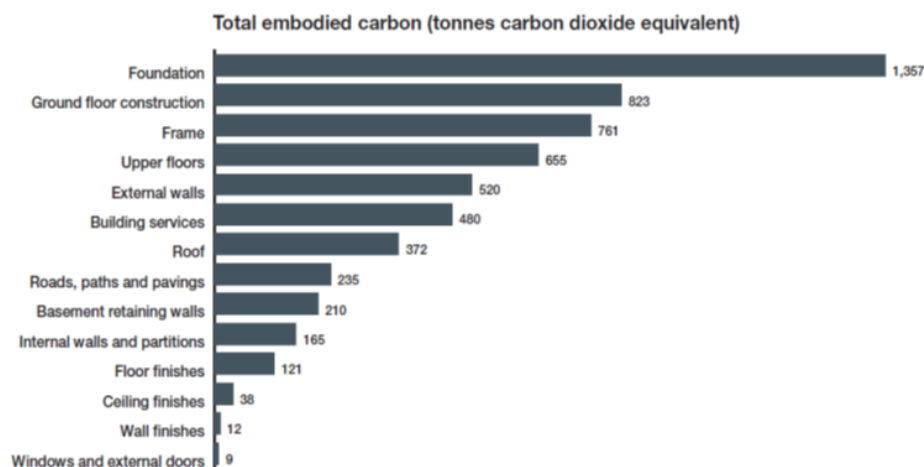
ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประเมินการปล่อยสารคาร์บอนจากโครงการก่อสร้างที่มีการใช้คอนกรีตสำเร็จรูปและคอนกรีตหล่อในที่ พบว่ามีการศึกษาของ (Han, Chang, Liu, & Zhang, 2022) และ (Vasishta, Mehany, & Killingsworth, 2023) โดยในการศึกษาของ (Han et al., 2022) ระบุว่าวิธีการประเมินการปล่อยสารคาร์บอนโดยทั่วไป มี 4 วิธี ได้แก่

- (1) วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis)
- (2) วิธี Input – output method
- (3) วิธีวิเคราะห์ผลกระทบจากการทำงาน (Process-based analysis)
- (4) วิธี Hybrid analysis

แต่เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis) ต้องอาศัยข้อมูลจากเอกสารหลาย ๆ แหล่งที่รวบรวมข้อมูลทางสถิติซึ่งรวบรวมจากกลุ่มตัวอย่าง ทำให้ยากในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระดับโครงการและระดับกิจกรรมการทำงาน ส่วนวิธี Input – output method เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ขาเข้า-ขาออก (มักใช้ในงานวิจัยทางเศรษฐศาสตร์) ในรูปแบบ I-O หรือ ตารางปัจจัยการผลิต โดยเป็นวิธีในระดับเศรษฐกิจมหภาค (Macroeconomic scale) ซึ่งมีขอบเขตการศึกษาที่กว้างมากและต้องใช้งบประมาณและเวลานานในการศึกษา ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับการศึกษาครั้งนี้

ส่วนวิธีวิเคราะห์กระบวนการทำงาน (Process-based analysis) เป็นวิธีที่องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2554) ของไทยแนะนำ โดยมีการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในหลายระดับที่แตกต่างกัน ได้แก่ ระดับองค์การ (Organizational level) ระดับโครงการ (Project level) และระดับกระบวนการทำงาน (Activity level) โดยกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบ คือ (1) input (2) process และ (3) output โดยแนวคิดของวิธีวิเคราะห์กระบวนการทำงาน (Process-based analysis) ถือเป็นแนวคิดที่ให้ความสำคัญกับกระบวนการทำงานและผู้ปฏิบัติงานเพื่อการปรับปรุงกระบวนการให้ดียิ่งขึ้น

ตัวอย่างโครงการกรณีศึกษาที่ใช้วิธีวิเคราะห์กระบวนการทำงาน เช่น โครงการสถานีรถไฟ Farringdon ที่ได้รับการพัฒนาเพื่อรองรับรถไฟที่ยาวขึ้นและผู้โดยสารที่เพิ่มขึ้น พร้อมทั้งมีการประเมินปริมาณ embodied carbon ของสถานีนี้ และพบว่าต้องมีการปรับปรุงวัสดุก่อสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ของกรอบอาคาร และมีการประเมิน embodied carbon อีกครั้ง ผลการประเมินปริมาณ embodied carbon โดยวิธีวิเคราะห์กระบวนการทำงานของโครงการนี้ เป็นดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งจากการเข้ามามีส่วนร่วมของผู้ปฏิบัติงานส่งผลให้โครงการก่อสร้างนี้สามารถลดปริมาณก๊าซ CO₂ สะสมในการก่อสร้างได้มากกว่า 3,000 ตัน



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการประเมิน Embodied carbon สถานีรถไฟ Farringdon
ที่มา : Embodied carbon assessment of the Farringdon Station redevelopment (2012)

ส่วนวิธีสุดท้าย คือ วิธี Hybrid analysis เป็นวิธีที่เกิดจากการนำวิธีทั้ง 3 ก่อนหน้านั้นมาใช้ผสมกัน

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่า วิธีที่ 3 หรือ วิธีวิเคราะห์ผลกระทบจากกระบวนการทำงาน (Process-based analysis) มีความเหมาะสมที่สุดต่อการนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยวิธีนี้ยังมีวิธีย่อย 3 วิธี ได้แก่

- วิธีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าแฟกเตอร์ (Coefficient method) ซึ่งเป็นการประมาณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผลคูณของกิจกรรมการทำงานใด ๆ และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยการปล่อยก๊าซ CO₂ ของกิจกรรมนั้น ๆ
- วิธี Mass balance ซึ่งประมาณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปัจจัยนำเข้าและผลผลิตที่ได้ของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการ
- วิธีการประเมินโดยการวัดจริง (Actual assessment method) เป็นการวัดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จริงที่เกิดขึ้นในกิจกรรมการทำงาน

โดยแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษานี้เน้นการประเมินโดยวิธีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าแฟกเตอร์ (Coefficient method)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ โดยวิธีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าแฟกเตอร์ (Coefficient method) เป็นดังแสดงในสมการที่ 2.5 (Han et al., 2022)

$$E = \sum_{i=1}^n a_i f_i \quad (2.5)$$

โดยที่ค่า E	คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม (Embodied CO ₂)
n	คือ จำนวนกิจกรรมทั้งหมดที่ปล่อย CO ₂
i	คือ กิจกรรม i
a_i	คือ จำนวนกิจกรรม i ที่มีการปล่อยก๊าซ CO ₂
f_i	คือ ค่าแฟกเตอร์จากการปล่อยการปล่อยก๊าซ CO ₂ ของกิจกรรม i

โดยขอบเขตของการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะทำการวัด Embodied CO₂ ของโครงการก่อสร้างทั้ง 2 ระบบ ตั้งแต่ช่วงเตรียมการก่อนการก่อสร้าง (Preparing phase) ช่วงระหว่างการก่อสร้าง (Construction phase) และช่วงดำเนินงานหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ (O&M phase) ส่วน Operational carbon ของทั้ง 2 ระบบนั้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นการศึกษานี้จึงไม่ได้รวม Operational carbon ของทั้ง 2 ระบบในช่วง O&M

2.7 ตัวแบบการรวมต้นทุนรวมตลอดอายุโครงการและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกัน (Integrated life cycle cost and environmental impact assessment models)

ที่ผ่านมาได้มีการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่มีทั้งแบ่งแยกกัน และแบบที่พยายามรวมการประเมินทั้ง 2 อย่างเข้าด้วยกัน โดยใช้ดัชนีเป็นตัวชี้วัดผลการประเมินรวม ยกตัวอย่าง เช่น ตัวแบบการรวมต้นทุนรวมตลอดอายุโครงการและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกันนั้นที่เรียกว่า Green Growth Index (GGI) (Kokkaew, Rudjanakanoknad, & Jittichai, 2017) เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยได้นำไปใช้ในการประเมินค่า GGI ของโครงการทางหลวงระหว่างเมืองกาญจนาภิเษก (มอเตอร์เวย์ หมายเลข 9) โดยมุ่งเน้นการประเมินไปที่ดัชนีทางด้านเศรษฐกิจของโครงการ (ECI) และดัชนีทางด้านสิ่งแวดล้อม (ENI) โดยใช้ตัวชี้วัดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการรวมตัวชี้วัดทั้ง 2 เป็นตัวชี้วัดตัวเดียว คือ GGI (Green Growth Index) โดยค่านี้จะเป็นค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพของโครงการทางด้านสิ่งแวดล้อมและทางเศรษฐกิจจากอดีตถึงปัจจุบัน ซึ่งจะช่วยให้เจ้าของ โครงการเห็นแนวโน้มของค่า GGI (Green Growth Index) ในช่วงดำเนินงาน

2.8 ระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ

ธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ประเภทบ้านนั้นมีเป้าหมาย คือ การรับจ้างสร้างบ้านในที่ดินลูกค้า ออกแบบเขียนแบบเพื่อขอใบอนุญาต ดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งจากอดีตที่ผ่านมาธุรกิจการ สร้างอสังหาริมทรัพย์ประเภทบ้านนั้นมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง และในเขตตัวเมืองเพราะมีการ ขยายตัวของประชากรอย่างรวดเร็วส่งผลถึงความต้องการในการมีที่พักอาศัยเพิ่มขึ้น (ฉัตร สุทธิวารีย์, 2011) ส่วนธุรกิจก่อสร้างประเภทอาคารสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนโดมิเนียม นั้น ยังคงมีการพัฒนา เพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกันดังที่ได้กล่าวไป ซึ่งจากธุรกิจการสร้างอสังหาริมทรัพย์ทั้ง 2 ประเภทนั้น ในปัจจุบันนี้เจ้าของอาคารหรือเจ้าของโครงการมีความรู้ความเข้าใจในระบบการก่อสร้างมากขึ้นกว่า แต่ก่อนและมีส่วนในการตัดสินใจเลือกระบบการก่อสร้างเองมากขึ้น โดยระบบการก่อสร้างในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ระบบหล่อในที่ และ ระบบหล่อสำเร็จ

ระบบหล่อในที่ (Cast-in place system) คือ ระบบก่อสร้างที่สร้างขึ้นส่วนหรือองค์ประกอบ ต่าง ๆ ที่เป็นโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างที่ต้องสร้าง ณ สถานที่ก่อสร้าง โดยจะมีแบบหล่อไว้เป็นตัว แบบ เช่น เสา คาน พื้น เป็นต้น โดยระบบหล่อในที่นั้นมีข้อดี คือ เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นได้ กล่าวคือ สามารถลดหรือขยายต่อเติมองค์ประกอบหรือขึ้นส่วนโครงสร้างสิ่งก่อสร้างได้ค่อนข้าง สะดวก

ส่วนระบบหล่อสำเร็จ (Precast concrete system) คือ ระบบการก่อสร้างที่ใช้วัสดุหรือ ขึ้นส่วนสำเร็จรูปมาประกอบและติดตั้ง ณ สถานที่ก่อสร้าง ซึ่งขึ้นส่วนสำเร็จรูปต่าง ๆ นั้นต้องการ รองรับมาตรฐานทางด้านวิศวกรรม และยังสามารถช่วยลดการเวลาในการก่อสร้างรวมถึงค่าใช้จ่าย ด้านแรงงาน (นายสืบตระกูล สมบัติทิพย์, 2011) นิยาม ระบบหล่อสำเร็จว่าเป็น ระบบก่อสร้างที่ผลิต ขึ้นส่วนอาคารออกเป็นส่วน ๆ แล้วนำมาติดตั้งประกอบกัน ณ ที่ก่อสร้าง หรือผลิตจากโรงงานเสร็จ แล้ว แล้วสามารถนำไปเคลื่อนย้ายเพื่อนำไปใช้สอยได้ทันที โดย (กองกฤษณ์ โตชัยวัฒน์, 2017) มอง ระบบหล่อสำเร็จว่า เป็นระบบที่สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างได้ อีกทั้งได้คุณภาพที่ดีขึ้น และลดการพึ่งพาแรงงานซึ่งเป็นทรัพยากรสำคัญของการก่อสร้าง

อย่างไรก็ตามระบบหล่อสำเร็จ (Precast concrete) ยังพบว่ามีความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นหลัง การติดตั้งโดยเจ้าของโครงการมักประสบกับปัญหาในการจ่ายค่าซ่อมแซมบำรุงรักษาที่เกิดขึ้นในช่วง การใช้งานที่สูงขึ้น เช่น แผ่นผนังร้าว หรือ เกิดการร้าวซึม เป็นต้น ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวมในการติดตั้งและ บำรุงดูแลรักษานั้นจึงเป็นสิ่งที่เจ้าของโครงการควรคำนึงถึงอย่างยิ่ง เพราะหากไม่คำนวณค่าใช้จ่าย รวมในการติดตั้งและบำรุงดูแลรักษาตลอดอายุการใช้งาน จะส่งผลกระทบต่อประเมินต้นทุนการ ก่อสร้างที่ถูกต้อง (ต่ำเกินไป) และทำให้เกิดการตัดสินใจการลงทุนที่ผิดพลาดได้ อีกทั้งในปัจจุบันการ ก่อสร้างโดยใช้ระบบนี้ยังทำให้เกิดผลกระทบของแต่ละกระบวนการต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะวิกฤติ ภาวะโลกร้อน ที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีแหล่งที่มาจากการใช้

คอนกรีต จาก Turner LK & Collins FG (2013) พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement, OPC) หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Type I) ตามมาตรฐาน ASTM C150-07 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ นั้นมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีค่าประมาณ 5% ถึง 7% ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทั้งหมดในโลกที่จากมนุษย์สร้างขึ้น

โดยทั่วไประบบหล่อสำเร็จมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องดังแสดงในรูป 2.17



รูปที่ 2.17 กระบวนการผลิต ขนส่ง ติดตั้ง คอนกรีตสำเร็จรูป

ปรับแก้มาจาก : CPANEL & CPAC

2.9 ความไม่แน่นอนและปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งาน

ในการศึกษาครั้งนี้ หลังจากทำการคำนวณ Life - cycle cost แล้วนั้นค่าที่ได้มาต้องทำการคำนวณผ่านแบบจำลองมอนติคาร์โล เพื่อหาช่วงของความน่าจะเป็นของ Life - cycle cost จากปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงได้ในอนาคต ที่มาจากหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น

- 1) การเปลี่ยนแปลงของราคาตามกลไกตลาด ในการเปลี่ยนแปลงราคาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาจมีการเปลี่ยนแปลงของราคาที่เกิดขึ้นก่อนการก่อสร้างหรือระหว่างดำเนินการก่อสร้าง เช่น ดัชนีราคาวัสดุการก่อสร้างที่บ่งชี้ให้เห็นถึงอัตราการผลิตของราคาวัสดุการก่อสร้าง, ราคาน้ำมันโลกก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าขนส่งมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ชี้ให้เห็นการเปลี่ยนไปของราคาวัสดุก่อสร้างเช่นกัน
- 2) การเปลี่ยนแปลงของราคาตามลักษณะทางกายภาพ คือ ท่าเลที่ตั้ง ภูมิศาสตร์ สภาพแวดล้อมของโครงการที่มีผลต่อราคาวัสดุก่อสร้าง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสะดวกในการทำงานว่าจะสามารถทำได้หรือไม่รวมถึงผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายวัสดุใกล้เคียงที่ยังต้องเอามาพิจารณา
- 3) ต้นทุนการซ่อมแซมปรับปรุงในอนาคตในช่วงการใช้งาน (O&M) ซึ่งมีความไม่แน่นอน ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น คุณภาพของงานก่อสร้างและปัจจัยด้านสภาพสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

2.10 ตัวแบบการพยากรณ์ตัวแปรที่สำคัญ

การพยากรณ์ คือ การคาดคะเนหรือคาดการณ์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอนาคตโดยจะศึกษาแนวโน้มรูปแบบการเกิดเหตุการณ์ด้วยการใช้ข้อมูลในอดีตหรือข้อมูลปัจจุบัน (นิภา นิรุตติกุล, 2551)

วิธีการพยากรณ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การพยากรณ์เชิงคุณภาพ (Qualitative forecasting methods) และการพยากรณ์เชิงปริมาณ (Quantitative forecasting methods) (วัชระ พิชิตมโน, 2550)

- การพยากรณ์เชิงคุณภาพ (Qualitative forecasting methods)

เป็นการพยากรณ์ที่อาศัยข้อมูล เชิงพรรณนา เช่น ความรู้สึกวิจารณ์ ทักษะความคิดเห็นส่วนตัว ประสบการณ์ เป็นพื้นฐานในการพยากรณ์ เหมาะสำหรับการที่มีข้อมูลเชิงปริมาณไม่เพียงพอหรือไม่สามารถรวบรวมข้อมูลในอดีตได้ ซึ่งมีหลายวิธีดังนี้

1.1 วิธีเดลฟาย (Delphi Method)

1.2 วิธีสอบถามผู้บริหารระดับสูง

- 1.3 วิธีสอบถามพนักงานระดับปฏิบัติ
- 1.4 วิธีสอบถามผู้เชี่ยวชาญ
- 1.5 วิธีสำรวจตลาด

- การพยากรณ์เชิงปริมาณ (Quantitative forecasting methods)

เป็นการพยากรณ์ที่ใช้ข้อมูลในอดีตเป็นหลัก ในการพิจารณาถึงสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยอาศัยหลักสถิติ ความน่าจะเป็น และคณิตศาสตร์ โดยผู้ทำการพยากรณ์ต้องตรวจสอบรูปแบบของข้อมูลที่จะนำมาใช้คำนวณว่าข้อมูลมีลักษณะรูปแบบอย่างไร จากนั้นจึงจะเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับรูปแบบนั้น

โดยวิธีการพยากรณ์เชิงปริมาณที่นิยมใช้ คือ การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เป็นกระบวนการทางสถิติที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable) และตัวแปรตาม (Dependent Variable) โดยรักษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม การวิเคราะห์ดังกล่าวจะมีตัวแปรตามเพียง 1 ตัวและจะมีตัวแปรอิสระกี่ตัวก็ได้ เมื่อมีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวจะเรียกว่า การวิเคราะห์ถดถอยอย่างง่าย (Simple Linear Regression) แต่หากตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปจะเรียกว่า การวิเคราะห์ถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

- การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Single Linear Regression)

การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายเป็นการวิเคราะห์การถดถอยในลักษณะที่มีตัวพยากรณ์หนึ่งตัว ซึ่งความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรตามและตัวพยากรณ์นั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear relationship) รูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย เมื่อมีตัวพยากรณ์ (X) 1 ตัว และตัวแปรตาม (Y) 1 ตัว สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.6

$$\hat{y} = b_0 + b_1x \quad (2.6)$$

โดยที่ \hat{y} = ค่าพยากรณ์ตัวแปรตาม

b_0 = ค่าคงที่

b_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ หรือ ความชันของเส้นถดถอย

- การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis)

เป็นการพยายามที่จะประมาณค่าเชิงสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Dependent Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์กับตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งตัวแปรอิสระที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณแสดง ดังสมการ 2.7

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (2.7)$$

โดยที่ \hat{y} = ค่าพยากรณ์ตัวแปรตาม

b_0 = ค่าคงที่

b_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ ตัวที่ 1

b_2 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ ตัวที่ 2

b_k = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ ตัวที่ k

2.11 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 โดยช่วงพิสัยของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นขึ้นกับดุลพินิจของตัว (Attakrai Punpukdee, 2009) หรือกล่าวคือการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเป็นการกำหนดค่าที่เป็นตัวแปรอิสระที่ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามภายใต้สมมติฐานที่กำหนด ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหนักแน่นหรือความเสถียรของผลลัพธ์จากการทำการทดลอง โดยจะทดสอบจากการเปลี่ยนแปลงค่าบางอย่างในการศึกษานั้น ๆ เพื่อหาว่าการเปลี่ยนค่านั้น ๆ มีผลกระทบต่อผลลัพธ์สุดท้ายหรือไม่ ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีที่ทำให้ตัวให้ตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง รวมไปถึงช่วยในการลดความไม่แน่นอนของการทดลอง (Kenton, 2022)

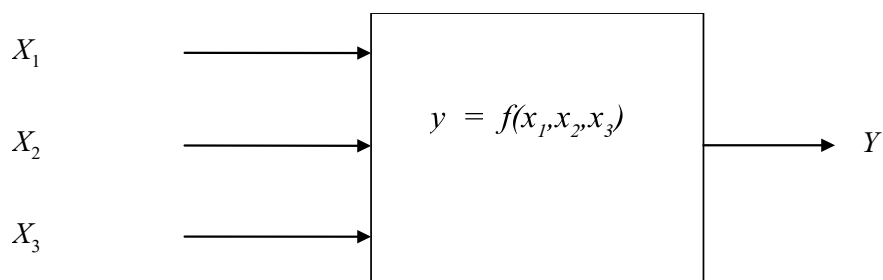
ดังนั้นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวจึงมีประโยชน์ เพื่อกำหนดผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

2.12 แบบจำลองมอนติคาร์โล

การจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo) เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่คาดการณ์ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอน โดยแบบจำลองมอนติคาร์โลรูปแบบแรกถูกคิดค้นมาเพื่อแก้ปัญหาในการหาพื้นที่วงกลม โดยสามารถประมาณค่า π ได้โดยการวางเข็มลงบนพื้นที่ทำจากแถบระยะเท่ากัน ต่อมาในช่วงทศวรรษที่ ค.ศ. 1930 Enrico Fermi นักฟิสิกส์ชาวอิตาลีได้ทดลองวิธีมอนติคาร์โลเป็นครั้งแรกในขณะที่ศึกษาการแพร่กระจายของนิวตรอน ในปีที่ ค.ศ. 1946 แบบจำลองมอนติคาร์โลได้ถูกนำมาใช้อีกครั้ง เมื่อนักฟิสิกส์อาวุธนิวเคลียร์ในโครงการอาวุธนิวเคลียร์ที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติ Los Alamos National Laboratory ต้องการศึกษาการแพร่กระจายของนิวตรอนในวัสดุที่แยกตัวได้ แต่กลับไม่สามารถแก้ปัญหาโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์แบบธรรมดาและกำหนดได้ ถึงแม้ว่าจะมีข้อมูลที่เป็นส่วนใหญ่ เช่น ระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนจะเดินทางในสสารก่อนที่มันจะชนกับนิวเคลียสของอะตอม และพลังงานที่นิวตรอนน่าจะปล่อยออกมาหลังจากการชนกันก็ตาม ดังนั้นด้วยเหตุการณ์ข้างต้นทำให้ นักวิจัยชื่อ Stanislaw Ulam ซึ่งทำงานในโครงการ Los Alamos ได้เสนอวิธีมอนติคาร์โลเพื่อทำการเก็บข้อมูลการทดลองของการแพร่กระจายของนิวตรอนในวัสดุที่แยกตัวได้หลายรอบ ผ่านคอมพิวเตอร์เครื่องแรกของโลกที่ชื่อว่า ENIAC โดยมีเพื่อนร่วมงานที่ชื่อ John von Neumann เป็นคนคิดค้นขึ้นมา เพื่อใช้ในการวางแผนและการคำนวณจริงของการแพร่กระจายของนิวตรอน

การจำลองมอนติคาร์โล เป็นวิธีการใช้ตัวเลขแบบสุ่ม (Random Numbers) เพื่อศึกษาคุณสมบัติเฉพาะต่าง ๆ ของระบบ จัดเป็นการจำลองระบบเชิงสถิติ (Stochastic Modeling) ในการจำลองระบบโดยวิธีมอนติคาร์โล จะทำการสร้างตัวเลขแบบสุ่มที่มีความน่าจะเป็นของการกระจายตัว (Probability Distribution) ที่สอดคล้องกับตัวแปรต้น n ตัวแปร ของระบบอันได้แก่ (X_1, X_2, \dots, X_n) ขึ้นมาครั้งละหนึ่งชุดเป็นข้อมูลนำเข้าระบบ (Input) ผลลัพธ์ข้อมูลขาออก (Output) ของระบบ หาได้จากสมการ $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ บันทึกผลลัพธ์เก็บไว้ เรียกว่าเป็นการจำลองระบบ 1 ครั้ง (1 trial) ทำการจำลองระบบตามขั้นตอนที่กล่าวนี้หลายครั้ง ประมาณมากกว่า 100,000 ($m = 100,000$) ครั้ง นำผลลัพธ์ของการจำลองระบบนี้มาเขียนเป็นกราฟ จะได้ลักษณะการกระจายตัวของผลลัพธ์ตลอดจนค่าสถิติต่างๆ ของ ผลลัพธ์อันได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าตัวเลขขอบเขตช่วงกว้างที่ครอบคลุม 95% ของผลลัพธ์ (95% confidence level) (เพียร์โตท่าโรง, 2016)

ตัวอย่างแผนภาพแสดงการจำลองมอนติคาร์โล กรณีระบบมี 3 ตัวแปรนำเข้า (X_1, X_2, X_3) เป็นดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงการจำลองมอนติคาร์โล ของตัวแบบคณิตศาสตร์กรณีระบบมี 3 ตัวแปร
นำเข้า (Input variables)

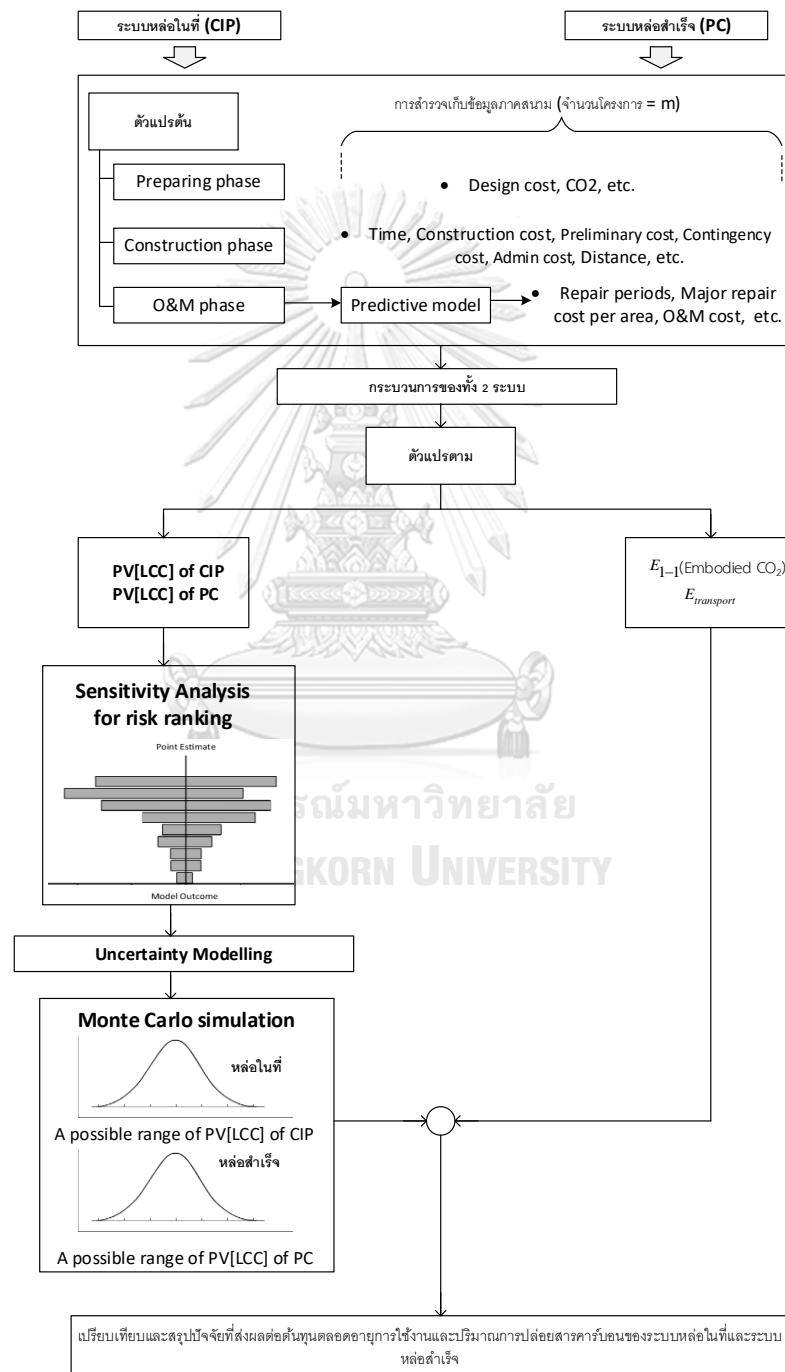
ที่มา: www.nimt.or.th/training/files/monte_carlo_simulation.pdf

วิธีการมอนติคาร์โลเป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life-cycle cost) ในอนาคตที่มาจากต้นทุนในการใช้งานและซ่อมแซมบำรุงรักษา ของระบบการก่อสร้างคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place) และระบบคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete)

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 กรอบความคิดเบื้องต้น

กรอบแนวความคิดของงานวิจัยนี้เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กรอบแนวความคิดของการวิจัย

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากกรอบแนวคิดของงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนของงานวิจัยมีเป็นดังต่อไปนี้

1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยทำการศึกษาข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำทฤษฎีและงานวิจัยมารองรับและเป็นต้นแบบให้กับงานวิจัยของผู้จัดทำ ทั้งหนังสือ บทความทางวิชาการ วิทยานิพนธ์ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของอาคารและการประเมินปริมาณสารคาร์บอนที่ปล่อยออกมาจากตัวอาคารตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของโครงการที่ใช้ (1) ระบบคอนกรีตหล่อในที่ และ (2) ระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ

2 เก็บข้อมูลเบื้องต้นเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หลังจากศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วเสร็จ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตในการคำนวณและตัวแปรที่สำคัญในแต่ละช่วงเวลาของโครงการ ได้แก่ (1) ช่วงเตรียมการ (2) ช่วงก่อสร้าง และ (3) ช่วงดำเนินการ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากโครงการตัวอย่าง เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical model) สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ ซึ่งรายละเอียดของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุน (LCC) และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของทั้ง 2 ระบบ จะอยู่ในหัวข้อที่ 3.4

3 เก็บรวบรวมข้อมูลจากโครงการตัวอย่าง

ข้อมูลจากโครงการตัวอย่างนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์หาต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบคอนกรีตหล่อในที่ และระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ โดยจำแนกต้นทุนออกตามช่วง ได้แก่ (1) ช่วงการเตรียมการ (2) ช่วงการก่อสร้าง และ (3) ช่วงการใช้งานและบำรุงรักษา

4 วิเคราะห์หาตัวแปรเสี่ยงที่สำคัญของต้นทุนรวมของทั้ง 2 ระบบก่อสร้าง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)

หลังจากได้ค่า LCC ของโครงการทั้งหมดที่เก็บรวบรวมได้แล้ว ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์หาตัวแปรเสี่ยงของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ โดยใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เพื่อให้ทราบตัวแปรเสี่ยงสำคัญที่ส่งผลให้ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) มีการเปลี่ยนแปลงจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด พร้อมทั้งสร้าง Tornado diagram เพื่อช่วยบ่งชี้ว่าตัวแปรไหนที่เป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญ (Risk factor) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC)

5 การวิเคราะห์ LCC ที่นำปัจจัยความไม่แน่นอนของตัวแปรมาประกอบการวิเคราะห์

เมื่อทราบตัวแปรเสี่ยงที่สำคัญที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ผู้วิจัยจะนำตัวแปรเสี่ยงเหล่านั้นมาสร้างเป็นสมการเพื่อพยากรณ์ค่าที่เป็นไปได้ของตัวแปร และนำตัวแปรนั้นไปใช้ในการวิเคราะห์ช่วงที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Range of possible LCCs) ของทั้ง 2 ระบบ โดยใช้การจำลอง Monte Carlo

6 วิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) และการปล่อยก๊าซ CO₂ ของทั้ง 2 ระบบก่อสร้าง

จากผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวและผลการวิเคราะห์ช่วงที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Range of possible LCCs) ของทั้ง 2 ระบบ โดยใช้ Monte Carlo simulation ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) และการปล่อยก๊าซ CO₂ ของทั้ง 2 ระบบก่อสร้าง ว่ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) และการปล่อยก๊าซ CO₂ ที่เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) และการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) นั้นจะทำการเก็บข้อมูลภาคสนามจากโครงการงานก่อสร้างอาคารชุด โดยทำการเก็บข้อมูลจากโครงการก่อสร้างตัวอย่าง 6 โครงการ

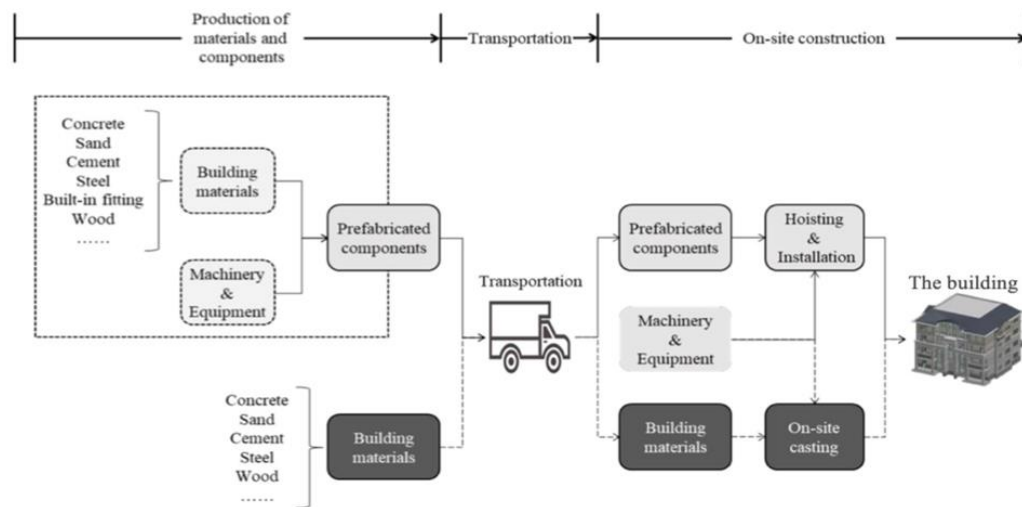
โดยข้อมูลของแต่ละโครงการที่ต้องเก็บข้อมูลนั้นได้แก่

- Design cost
- Preliminary cost
- Construction cost
- Contingency costs
- Admin costs
- Minor repair cost
- Major repair cost
- ข้อมูลและต้นทุนในการสร้าง Precast concrete
- ระยะเวลาในการขนส่งคอนกรีตทั้งระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จจากโครงการนั้น ๆ
- ปริมาณคอนกรีตที่ใช้ ในโครงการก่อสร้างนั้น ๆ

3.4 การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์

3.4.1 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้และปริมาณการปล่อยสารคาร์บอน

ขอบเขตของการวัด (Boundary) สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนในช่วงเตรียมการและช่วงก่อสร้างของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกำหนดขอบเขตของการวัดต้นทุนและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนในช่วงเตรียมการและช่วงก่อสร้าง

ที่มา: (Han et al., 2022)

ส่วนการวิเคราะห์ต้นทุนวงจรชีวิตโดยทั่วไปจะรวมต้นทุนรายปีตลอดอายุการใช้งานโดยใช้แนวคิดตามมูลค่าของเงินตามเวลา โดยมีสูตรการคำนวณดังสมการ 3.1 (Bidanda, 2022)

$$LCC = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) งานวิจัยนี้ได้สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1.1 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อในที่

$$LCC[CIP] = \sum_{t=0}^{t=T_{CIP}} \frac{C_{CIP,k,t}}{(1+i)^t} \quad \text{โดยที่ } k \in \{1, 2, 3, \dots, 7\} \quad (3.2)$$

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
	$C_{CIP,t}$	$= C_{CIP,pp,t} + C_{CIP,cp,t} + C_{CIP,om,t}$
เมื่อ	$C_{CIP,pp,t}$	คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงเตรียมการ (Preparing phase) มี 1 รายการ คือ งานออกแบบ ($k = 1$)
	$C_{CIP,pp,t}$	คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงก่อสร้าง (Construction phase) มี 4 รายการ ได้แก่ งาน Preliminary ($k = 2$), งานก่อสร้าง ($k = 3$), ต้นทุน Contingency cost ($k = 4$), ต้นทุน Admin & legal ($k = 5$)
	$C_{CIP,om,t}$	คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงดำเนินการ (O&M phase) มี 2 รายการ ได้แก่ งาน Minor repair ($k = 6$), งาน Major repair ($k = 7$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.1.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อสำเร็จ

$$LCC[PC] = \sum_{t=0}^{t=T_{PCF}} \frac{C_{PC,k,t}}{(1+i)^t} \quad \text{โดยที่ } k \in \{1, 2, 3, \dots, 7\} \quad (3.3)$$

โดย	$LCC[PC]$	คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จ
	$C_{PC,k,t}$	คือ ต้นทุนของงาน k ณ ปีที่ t โดยมีงานทั้งหมด 7 รายการ
	i	คือ อัตราคิดลดโดยใช้อัตราเงินเฟ้อ
	T_{PC}	คือ ระยะเวลารวมช่วงก่อสร้างและช่วงใช้งาน
	$C_{PC,t}$	$= C_{PC,pp,t} + C_{PC,cp,t} + C_{PC,om,t}$
เมื่อ	$C_{PC,pp,t}$	คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงเตรียมการ (Preparing phase) มี 1

รายการ คือ งานออกแบบ ($k = 1$)

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

$C_{PC,OM,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงดำเนินการ (O&M phrase) มี 2 รายการ ได้แก่ งาน Minor repair ($k = 6$), งาน Major repair ($k = 7$)

3.4.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณปริมาณสารคาร์บอนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวแปรในโมเดลการคำนวณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 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 จากวัตถุดิบโดยตรง

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

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{i-j} [PC] \text{ และ } E_{i-j} [CIP] \quad (3.4)$$

สำหรับชิ้นส่วนของสิ่งก่อสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete) และแบบคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place concrete)

จากสมการที่ (3.4) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของกระบวนการของงานคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete) และงานคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place concrete) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

E_{i-1} คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากวัตถุนั้นโดยตรง ในช่วงเตรียมการ โดยแบ่งออกได้เป็น

$E_{i-1}[PC]$ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นโดยตรง ในช่วงเตรียมการ

$E_{i-1}[CIP]$ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากคอนกรีตหล่อในที่นั้นโดยตรง ในช่วงเตรียมการ

3.4.2.1 โมเดลการวัดปริมาณก๊าซ CO_2 ที่มาจากวัสดุโดยตรง

ปริมาณก๊าซ CO_2 ที่มาจากวัสดุโดยตรง ประเมินได้โดยใช้วิธี Coefficient method (Han et al., 2022) ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$E_{i-1} = \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^n \left[\frac{A_p}{A'_p} \times M_{pq} \times f_q \right] \quad (3.5)$$

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

3.4.2.2 โมเดลการวัดปริมาณก๊าซ CO_2 ที่มาจากเครื่องจักร

ส่วนปริมาณก๊าซ CO_2 ที่มาจากเครื่องจักร ประเมินได้โดยใช้วิธี Coefficient method (Han et al., 2022) มีสมการเป็นดังนี้

$$E_{i-2} = \sum_{p=1}^m \sum_{q'=1}^{n'} \left[\frac{A_p}{A'_p} \times M_{pq'} \times f_{q'} \times C_{q'} \right] \quad (3.6)$$

โดยที่ f_q คือ Carbon emission factor จากเครื่องจักร q' และ C_q คือ ปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องจักร q'

เนื่องด้วย การพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จนั้น มีการใช้วัสดุที่เป็นคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันและปริมาณคอนกรีตที่ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานให้ใช้ปริมาณเท่ากันในทั้ง 2 มุมมอง เป็นผลให้ค่า Embodied CO₂ มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในมุมมองระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ ดังนั้นเพื่อต้องการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากก๊าซ CO₂ ระยะทางการขนส่งคอนกรีตของทั้ง 2 ระบบจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการคำนวณค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยค่าפקเตอร์ (Factor) ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของวัสดุและการขนส่ง เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.1

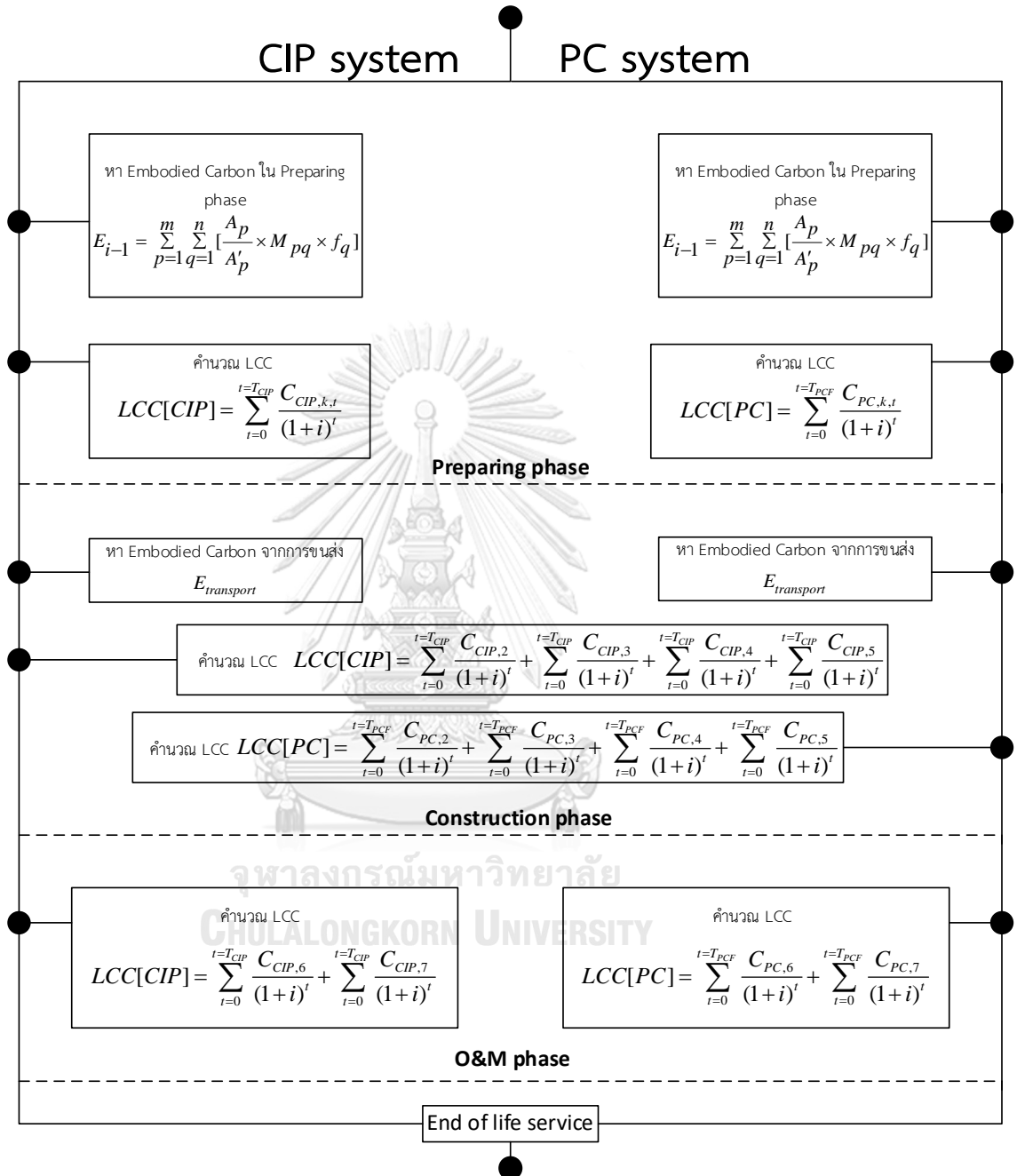
ตารางที่ 3.1 ค่า Factor ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของวัสดุและการขนส่ง

ลำดับที่	รายการ	ค่า Factor	หน่วย	แหล่งข้อมูล
1	รถบรรทุกซีเมนต์แบบไม่ 10 ล้อ 100% loading (คิดขาไป)	0.0611	kgCO ₂ e/km	[1.]
2	รถบรรทุกซีเมนต์แบบไม่ 10 ล้อ 0% loading (คิดขากลับ)	0.7382	kgCO ₂ e/km	[1.]
3	รถกระบะบรรทุกฟุ้ง 18 ล้อ 100% loading (คิดขาไป)	0.2150	kgCO ₂ e/km	[1.]
4	รถกระบะบรรทุกฟุ้ง 18 ล้อ 25% loading (คิดขากลับ)	0.0536	kgCO ₂ e/km	[1.]
5	f_q จากคอนกรีต	347.6430	kgCO ₂ e/m ³	[2.]
6	A_p ของคอนกรีต (Stair)	37.50	m ³	[2.]
7	A_p ของคอนกรีต (Beam)	626.66	m ³	[2.]
8	A_p ของคอนกรีต (Slab)	264.32	m ³	[2.]
9	A_p , Concrete engineering	10.00	m ³	[2.]
10	M_{pq} ของคอนกรีต	24.88	m ³	[2.]

[1.] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.)

[2.] Han, Q., Chang, J., Liu, G., & Zhang, H. (2022). The Carbon Emission Assessment of a Building with Different Prefabrication Rates in the Construction Stage.

3.5 สรุปกรอบการคำนวณเชิงเปรียบเทียบ



บทที่ 4

การประเมินเปรียบเทียบด้านต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC)

หลังจากการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical model) สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จโดย ดังแสดงในหัวข้อ 3.4 ของบทที่ 3 ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาตัวแปรเสี่ยงที่สำคัญของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) ของทั้ง 2 ระบบการก่อสร้าง โดยใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) เพื่อให้ทราบตัวแปรเสี่ยงสำคัญ (Key risk variables) ที่ส่งผลให้ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) มีการเปลี่ยนแปลงจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด พร้อมทั้งสร้าง Tornado diagram เพื่อช่วยบ่งชี้ว่าตัวแปรไหนที่เป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญ (Risk factor) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า LCC และเมื่อทราบตัวแปรเสี่ยงที่สำคัญที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ผู้วิจัยจะนำตัวแปรเสี่ยงเหล่านั้นมาสร้างเป็นสมการเพื่อพยากรณ์ค่าที่เป็นไปได้ของตัวแปร และนำตัวแปรนั้นไปใช้ในการวิเคราะห์หา “ช่วงที่เป็นไปได้” ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Possible range of LCCs) ของทั้ง 2 ระบบ โดยใช้การจำลอง Monte Carlo รายละเอียดในแต่ละหัวข้อเป็นดังต่อไปนี้

4.1 ที่มาของข้อมูลโครงการตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างมีความสำคัญอย่างมากต่อผลของการศึกษานี้ ผู้วิจัยจึงได้พยายามรวบรวมข้อมูลของตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ ดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 3

ข้อมูลของโครงการตัวอย่างแต่ละโครงการที่ผู้วิจัยได้ไปเก็บรวบรวมข้อมูล แบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

- ข้อมูลต้นทุนการเตรียมการ
- ข้อมูลต้นทุนในการก่อสร้าง
- ข้อมูลต้นทุนในการซ่อมบำรุงรักษา

ข้อมูลใน 2 ส่วนแรกได้จากเอกสารใบแสดงปริมาณงานและราคา หรือ BOQ (Bill of Quantities) ของโครงการตัวอย่างนั้น ๆ ของโครงการก่อสร้างของบริษัท ควอลิตี้ เฮ้าส์ จำกัด (มหาชน) บริษัท ยกเว้นค่าออกแบบ (Design cost) ซึ่งได้จากการให้ข้อมูลโดยตรงของทางผู้จัดการ

โครงการของบริษัท ซึ่งเป็นเจ้าของโครงการและดำเนินการก่อสร้าง แต่เนื่องด้วย นโยบายความเป็นส่วนตัว ส่วนตัว (Privacy Notice) ของบริษัทที่ต้องรักษาความเป็นส่วนตัวของเจ้าของโครงการ จึงเป็นเหตุให้ผู้วิจัยไม่สามารถบอกถึงรายละเอียดที่อยู่และข้อมูลที่ตั้งของโครงการตัวอย่างมาได้ สำหรับข้อมูลในส่วนที่ 3 ซึ่งเป็นต้นทุนในการซ่อมบำรุงรักษา ผู้วิจัยได้สอบถามจากช่างประจำที่รับซ่อมแซมและต่อเติมโครงการก่อสร้าง ณ โครงการนั้น เพื่อเอาค่านวนในตัวแปร Minor repair และ ตัวแปร Major Repair ใน phase ที่ 3 หรือ O&M phase รายละเอียดของโครงการตัวอย่าง เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของโครงการตัวอย่าง

โครงการ	ลักษณะโครงการ	มูลค่าค่าก่อสร้าง (บาท)	ปีที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ
1	โครงการบ้านเดี่ยว 2 ชั้น เป็นแบบผสมระหว่างหล่อในที่และหล่อสำเร็จ	8,888,231.00	2566
2	โครงการบ้านเดี่ยว 2 ชั้น เป็นแบบหล่อสำเร็จ	11,103,772.05	2565
3	โครงการบ้านเดี่ยว 2 ชั้น เป็นแบบหล่อสำเร็จ	10,842,577.42	2565
4	โครงการบ้านเดี่ยว 2 ชั้น เป็นแบบหล่อในที่	12,035,894.00	2562
5	โครงการบ้านเดี่ยว 2 ชั้น เป็นแบบหล่อในที่	12,177,286.00	2562
6	โครงการบ้านเดี่ยว 2 ชั้น เป็นแบบหล่อในที่	9,295,422.00	2557

* หมายเหตุ : มูลค่าค่าก่อสร้าง (บาท) รวมเฉพาะงานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรมเท่านั้น

4.2 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ

4.2.1 ระบบหล่อในที่ (Cast-in place: CIP)

สมการต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบหล่อในที่ เป็นดังนี้

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

โดย $LCC[CIP]$ คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่

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

i คือ อัตราคิดลดโดยใช้อัตราเงินเพื่อ

	T_{CIP}	คือ ระยะเวลารวมทั้งช่วงก่อสร้างและช่วงใช้งาน
	$C_{CIP,t}$	$= C_{CIP,pp,t} + C_{CIP,cp,t} + C_{CIP,om,t}$
เมื่อ	$C_{CIP,pp,t}$	คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงเตรียมการ (Preparing phase) มี 1 รายการ คือ งานออกแบบ ($k = 1$)
	$C_{CIP,cp,t}$	คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงก่อสร้าง (Construction phase) มี 4 รายการ ได้แก่ งาน Preliminary ($k = 2$), งานก่อสร้าง ($k = 3$), ต้นทุน Contingency cost ($k = 4$), ต้นทุน Admin & legal ($k = 5$)
	$C_{CIP,om,t}$	คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงดำเนินการ (O&M phase) มี 2 รายการ ได้แก่ งาน Minor repair ($k = 6$), งาน Major repair ($k = 7$)

4.2.2 ระบบหล่อสำเร็จ (Pre-cast : PC)

สมการต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบหล่อสำเร็จเป็นดังนี้

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

โดย $LCC[PC]$ คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จ

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

i คือ อัตราคิดลดโดยใช้อัตราเงินเฟ้อ

T_{PC} คือ ระยะเวลารวมทั้งช่วงก่อสร้างและช่วงใช้งาน

$$C_{PC,t} = C_{PC,pp,t} + C_{PC,cp,t} + C_{PC,om,t}$$

เมื่อ $C_{PC,pp,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงเตรียมการ (Preparing phase)

มี 1 รายการ คือ งานออกแบบ ($k = 1$)

$C_{PC,cp,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงก่อสร้าง (Construction phase)

มี 4 รายการ ได้แก่ งาน Preliminary ($k = 2$), งานก่อสร้าง ($k = 3$), ต้นทุน Contingency cost ($k = 4$), ต้นทุน Admin & legal ($k = 5$)

$C_{PC,om,t}$ คือ ต้นทุนทั้งหมดของงานในช่วงดำเนินการ (O&M phase) มี 2 รายการ ได้แก่ งาน Minor repair ($k = 6$), งาน Major Repair ($k = 7$)

4.2.3 อัตราคิดลดที่ใช้

ผู้วิจัยใช้อัตราคิดลดเป็นอัตราเงินเฟ้อของประเทศไทยที่ย้อนหลัง 10 ปี ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อัตราคิดลดในอดีตตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014 - 2022

ที่มา : <https://tradingeconomics.com>

4.2.4 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูล

ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลของโครงการตัวอย่างทั้ง 6 โครงการ ในแต่ละช่วงของโครงการ (ก่อนก่อสร้าง ช่วงก่อสร้าง และช่วงใช้งาน) เป็นดังนี้

4.2.4.1 ข้อมูลโครงการตัวอย่างที่ 1

ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลจากโครงการตัวอย่างที่ 1 ดังซึ่งเป็นงานก่อสร้างที่มีทั้ง 2 ระบบ เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างต้นทุนคอนกรีตหล่อในที่และหล่อสำเร็จของโครงการตัวอย่างที่ 1

โครงการ	มูลค่าค่าก่อสร้าง* (บาท)	ระบบ	ต้นทุนค่าก่อสร้างงานคอนกรีต (บาท)	ร้อยละของงาน (%)
1	8,888,231.00	หล่อในที่	1,266,020.00	14.24
		หล่อสำเร็จ	2,532,156.67	28.49
		รวม	3,798,176.67	42.73

* หมายเหตุ : มูลค่าค่าก่อสร้าง (บาท) รวมเฉพาะงานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรมเท่านั้น

4.2.4.2 ข้อมูลโครงการในช่วงก่อนก่อสร้างและช่วงก่อสร้าง

ข้อมูลที่ต้องเก็บรวบรวมจากโครงการตัวอย่างทั้งหมดในช่วงนี้ประกอบด้วย 5 ตัวแปร ได้แก่

- Design Cost (Cost component $k=1$)
- Preliminary Cost (Cost component $k=2$)
- Construction Cost (CIP) (Cost component $k=3$)
- Contingency Cost (Cost component $k=4$)
- Admin Cost (Cost component $k=5$)

โดยได้ข้อมูลโครงการตัวอย่างที่ 1 เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) โครงการตัวอย่างที่ 1 ของระบบหล่อในที่ (2 ช่วงแรก)

Cost components	Year 0	Year 1
	Preparing phase	Construction phase
1. Design Cost	23,000.00	-
2.1 Preliminary Cost		992,369.00*
2.2 Construction Cost (CIP)		3,074,703.33**
2.3 Contingency Cost		245,976.27**
2.4 Admin Cost		360,000.00*
Total cost ในช่วงเตรียมการและก่อสร้าง	23,000.00	4,673,048.60
PV [Total cost] ในช่วงเตรียมการและก่อสร้าง	23,000.00	4,581,420.20

* ข้อมูลจาก BOQ ของโครงการ

** ได้จากการปรับต้นทุนคอนกรีตหล่อสำเร็จทั้งหมดให้เป็นต้นทุนคอนกรีตหล่อในที่ 100% (PC → CIP)

ตารางที่ 4.4 ต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) โครงการตัวอย่างที่ 1 ของระบบหล่อสำเร็จ (2 ช่วงแรก)

Cost components	Year 0	Year 1
	Preparing phase	Construction phase
1.Design Cost	23,000.00	-
2.1 Preliminary Cost		992,369.00*
2.2 Construction Cost (PC)		4,304,584.67**
2.3 Contingency Cost		344,366.77*
2.4 Admin Cost		360,000.00*
Total cost ในช่วงเตรียมการและก่อสร้าง	23,000.00	6,001,320.44
PV [Total cost] ในช่วงเตรียมการและก่อสร้าง	23,000.00	5,883,647.49

* ข้อมูลจาก BOQ ของโครงการ

** ได้จากการปรับต้นทุนคอนกรีตหล่อในที่ทั้งหมดให้เป็น 100% ต้นทุนคอนกรีตหล่อสำเร็จ (CIP → PC)

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 องค์ประกอบของต้นทุน หรือ Cost components ในช่วงเตรียมการและช่วงก่อสร้าง ประกอบด้วย ตัวแปร 5 ตัวแปร ได้แก่ Design cost ($k=1$), Preliminary cost ($k=2$), Construction cost ($k=3$), Contingency cost ($k=4$), และ Administrative cost ($k=5$)

โดยมูลค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการตัวอย่างที่ 1 กรณีใช้ระบบการก่อสร้างแบบผสม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ผู้วิจัยได้ทำการปรับค่าต้นทุนก่อสร้าง (Construction cost) ให้เป็นระบบเดียวกันตลอดทั้งโครงการ โดยใช้ Conversion factor จากการสอบถามผู้จัดการโครงการ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้างของทั้ง 2 ระบบการก่อสร้าง

ผลการประมาณการต้นทุนก่อสร้างและ Contingency cost ของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ สำหรับโครงการตัวอย่างที่ 1 ที่ปรับให้เป็นระบบเดียวกันทั้งหมด แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

โดยตัวแปรตัวแรก ตัวแปร **Design cost** เป็นตัวแปรที่มาจาก ต้นทุนในส่วนของการออกแบบที่ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบประเภทของ shop drawing & as built drawing และตัวแปรนี้เกิดจากการสัมภาษณ์และขอข้อมูลจากผู้จัดการโครงการก่อสร้างในแต่ละโครงการ พบว่าไม่ว่าจะใช้ระบบการก่อสร้างแบบใดในโครงการตัวอย่างที่ 1 ค่าตัวแปร Design cost จะมีค่าใกล้เคียงกัน

ตัวแปรตัวที่สอง ตัวแปร **Preliminary cost** เป็นต้นทุนที่อยู่นอกเหนือจากต้นทุนในการก่อสร้างเจ้าของโครงการ (Developer) เช่น ต้นทุนในการจัดทำหนังสือคำประกันการยื่นประมูล หนังสือคำประกันเงินล่วงหน้า ต้นทุนสำนักงานใหญ่จากการ บริหาร บัญชี จัดซื้อ ทรัพยากรมนุษย์

ต้นทุนจากสาธารณูปโภค เป็นต้น จากการสอบถามผู้จัดการโครงการก่อสร้างในแต่ละโครงการ พบว่าไม่ว่าจะใช้ระบบการก่อสร้างแบบไหนในโครงการตัวอย่างค่าตัวแปร Preliminary cost จะมีค่าเท่ากัน

ตัวแปรตัวที่สาม ตัวแปร **Construction cost** เป็นต้นทุนที่ใช้ในการก่อสร้างที่เจ้าของโครงการ (Developer) จ่ายให้กับผู้รับเหมาก่อสร้าง (Contractor) โดยในตารางที่ 4.2 และ 4.3 เป็นต้นทุนในส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของงานโครงสร้างและสถาปัตยกรรมของโครงการเท่านั้น (ดังแสดงในตารางที่ 4.2) ตัวอย่าง เช่น เสา คาน พื้น บันได (งานโครงสร้าง) และผนัง (โครงสร้างหรือ สถาปัตยกรรม) เป็นต้น โดยผู้วิจัยได้ทำการสอบถามผู้จัดการโครงการก่อสร้างของโครงการนั้น ๆ ว่า ถ้าเปลี่ยนระบบการก่อสร้างของโครงการนั้น ๆ เป็นอีกระบบ Construction cost จะมีค่าเปลี่ยนไปเป็นเท่าไร ซึ่งโดยทางผู้จัดการโครงการก่อสร้างได้ให้ตัวคูณ (factor) ในแต่ละโครงการตัวอย่างที่แตกต่างกัน มาโดยระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จจะมีต้นทุนก่อสร้างประมาณ 1.3 – 1.5 เท่าของระบบหล่อในที่ หรือมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.37 ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปค่า Construction cost ของแต่ละโครงการ ทั้ง 2 ระบบ

โครงการ	Construction cost ($k=3$)		อัตราส่วน PC/CIP
	ระบบสำเร็จ (100%) $C_{PC,3,t}$	ระบบหล่อในที่ (100%) $C_{CIP,3,t}$	
1	4,304,584.67	3,074,703.33	1.40
2	6,145,447.12	4,382,932.89	1.40
3	7,613,152.43	5,745,775.42	1.32
4	7,220,879.90	5,554,523.00	1.30
5	7,687,574.70	5,913,519.00	1.30
6	5,650,680.00	3,767,120.00	1.50
	เฉลี่ย		1.37

ตัวแปรที่สี่ **Contingency cost** เป็นต้นทุนมีการเผื่อหรือสำรองไว้สำหรับการเผชิญเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดเจ้าของโครงการ (Developer) เช่น ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากการออกแบบที่ผิดพลาดหรือการเพิ่มเติม ค่าดำเนินการในการประสานงานกับหน่วยงานราชการ เป็นต้น

ตัวแปรที่ห้า **Administrative cost (Admin)** เป็นค่าใช้จ่ายพนักงานและบุคลากรในหน่วยงานภาคสนามของเจ้าของโครงการ (Developer) ทั้งหมด

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวแปรทั้ง 5 ของโครงการตัวอย่างทั้ง 6 โครงการ สรุปผลการวิเคราะห์หาต้นทุนในช่วงก่อนและระหว่างการก่อสร้างได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 สำหรับระบบหล่อในที่ และระบบหล่อสำเร็จ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 สรุปต้นทุนในช่วงเตรียมการและก่อสร้างของแต่ละโครงการ ในระบบหล่อในที่

โครงการ	$PV[C_{CIP,pp,t}]$	$PV[C_{CIP,cp,t}]$
1*	23,000.00	4,581,420.20
2*	35,000.00	6,121,144.62
3*	20,000.00	7,695,526.92
4	20,000.00	8,123,416.51
5	20,000.00	8,611,971.10
6	25,000.00	5,392,067.70

* โครงการ 1-3 เป็นโครงการที่ปรับต้นทุนคอนกรีตหล่อสำเร็จทั้งหมดให้เป็นต้นทุนคอนกรีตหล่อในที่ 100%

ตารางที่ 4.7 สรุปต้นทุนในช่วงเตรียมการและก่อสร้างของแต่ละโครงการ ในระบบหล่อสำเร็จ

โครงการ	$PV[C_{PC,pp,t}]$	$PV[C_{PC,cp,t}]$
1	23,000.00	5,883,647.49
2	35,000.00	7,987,336.17
3	20,000.00	9,672,749.63
4*	20,000.00	9,887,794.40
5*	20,000.00	10,490,383.02
6*	25,000.00	7,386,425.34

* โครงการ 1 และ 4-6 เป็นโครงการที่ปรับต้นทุนคอนกรีตหล่อในที่ทั้งหมดให้เป็นต้นทุนคอนกรีตหล่อสำเร็จ 100%

4.2.4.3 ข้อมูลโครงการในช่วงการใช้งาน

ในช่วงการใช้งานประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัวแปร ได้แก่

- Minor repair (Cost component $k=6$)
- Major repair cost (Cost component $k=7$)

ตัวแปรที่หก Minor repair เป็นต้นทุนที่เกิดในช่วงการใช้งาน (O&M phase) ที่มีการซ่อมแซมหรือต่อเติมในชิ้นส่วนหรือองค์ประกอบในโครงสร้างหลักบางส่วน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการสอบถามข้อมูลจากเจ้าของบ้าน (หรือลูกค้าของเจ้าของโครงการ) และช่างประจำที่ต่อเติมบ้านของโครงการตัวอย่างนั้นๆ เพื่อหาระยะเวลาในการซ่อมแซม โดยมีรายละเอียดในการหาช่วงเวลาในการซ่อมของ Minor repair cost

ตัวแปรที่เจ็ด Major repair cost เป็นต้นทุนที่เกิดจากการซ่อมครั้งใหญ่และมีการรื้อถอนของเจ้าของบ้านหรือลูกค้าของเจ้าของโครงการ โดยมีองค์ประกอบโครงสร้างหลักหลาย ๆ ส่วน ซึ่งในที่นี้ ผู้วิจัยใช้เวลาและราคาต่อพื้นที่ในการซ่อมครั้งใหญ่ของโครงการตัวอย่างนั้น จากการสอบถามช่างซ่อมแซมประจำตามโครงการตัวอย่างนั้นๆ โดยจากการสอบถามช่างประจำโครงการตัวอย่างนั้น ๆ พบว่ามีระยะเวลาประมาณ 15 ปี ของทั้ง 2 ระบบ ในการซ่อมใหญ่หรือมีการรื้อถอน

รายละเอียดของตัวแปรที่ 6 และ 7 เป็นดังนี้

1) ข้อมูล Minor repair cost

เนื่องด้วยการเก็บข้อมูลในส่วน O&M phase นั้น เป็นการเก็บข้อมูลที่ต้องใช้เวลาและมีอุปสรรคในการเก็บข้อมูล เพราะการประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการตัวอย่างนั้นต้องเก็บข้อมูลในส่วนที่เป็นอนาคตของช่วง O&M phase ด้วย ดังนั้นผู้วิจัยต้องทำการเก็บข้อมูลจากโครงการตัวอย่างต่าง ๆ ของการซ่อม Minor repair ว่าซ่อมทุกปีเท่าไร และ คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของของค่า Construction cost โดยผู้วิจัยจะทำการสอบถามช่างประจำโครงการตัวอย่างที่มีความชำนาญในการรับทำงานซ่อมแซมหรือต่อเติมโครงการตัวอย่างนั้น ๆ โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นราคาซ่อมแซมงานนั้น ๆ ต่อพื้นที่ ซึ่งผู้วิจัยต้องนำค่าที่ได้มาเปลี่ยนเป็นราคาซ่อมที่คิดเป็นร้อยละของค่า Construction cost และระยะเวลาหรือความถี่ในการซ่อมงานนั้น ๆ

ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นดังตารางที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.8 ข้อมูล Minor repair cost ของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อในที่

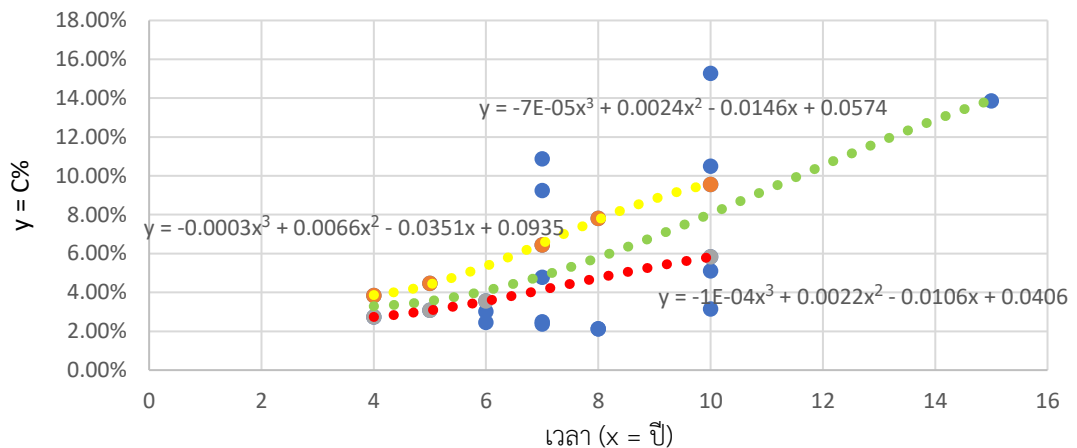
งานที่ซ่อมแซม	ราคาต่อพื้นที่ของบ้าน	ราคา	ความถี่ในการซ่อม	ร้อยละของ Construction Cost
1. ผนัง	455 บาท/ตร.ม.	176,995 บาท	10 ปี	5.83%
2. บันได	850 บาท/ตร.ม.	330,650 บาท	7 ปี	10.88%
3. เพดาน	300 บาท/ตร.ม.	116,700 บาท	4 ปี	3.84%
4. สี	240 บาท/ตร.ม.	93,960 บาท	5 ปี	3.07%
หมายเหตุ : พื้นที่ของบ้าน เท่ากับ 389 ตร.ม. และ ค่า Construction cost เท่ากับ 3,074,703.33				

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลรายการ Minor repair cost ของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อสำเร็จ

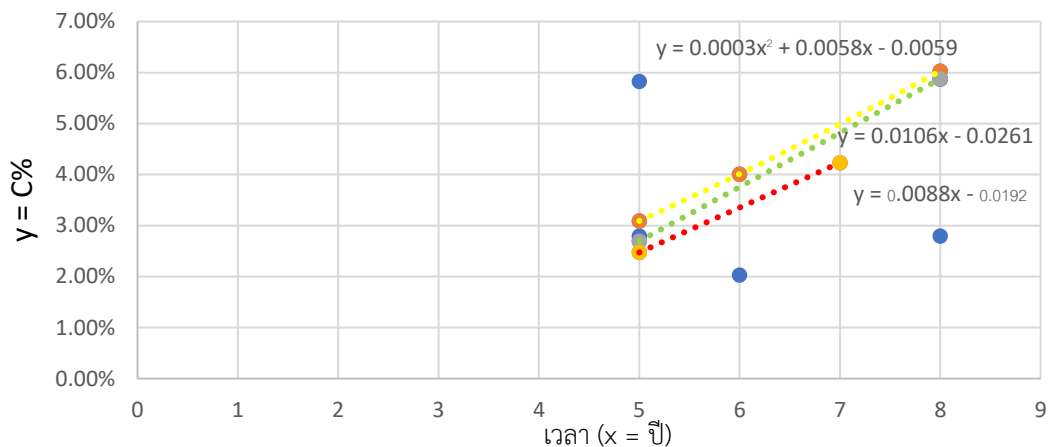
งานที่ซ่อมแซม	ราคาต่อพื้นที่ของบ้าน	ราคา	ความถี่ในการซ่อม	ร้อยละของ Construction Cost
1. ผนัง	650 บาท/ตร.ม.	260,000 บาท	5 ปี	5.82%
2. บันได	-	-	-	-
3. เพดาน	-	-	-	-
4. สี	345 บาท/ตร.ม.	152,000 บาท	5 ปี	3.09%
หมายเหตุ : พื้นที่ของบ้าน เท่ากับ 389 ตร.ม. และ ค่า Construction cost เท่ากับ 4,304,584.67				

หลังจากนั้นผู้วิจัยจะนำค่าร้อยละของ Construction cost และ ความถี่ในการซ่อม จากทุก ๆ โครงการตัวอย่าง มาวิเคราะห์หาสมการเพื่อพยากรณ์ต้นทุนของการซ่อม Minor repair โดยใช้วิธี “Envelope method”

โดยผลการวิเคราะห์หาสมการเพื่อพยากรณ์ต้นทุนของการซ่อมแบบ Minor repair โดยใช้วิธี “Envelope method” ของโครงการตัวอย่างระบบหล่อในที่ และระบบหล่อสำเร็จ เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 Envelope method ของตัวแปร Minor repair ระบบหล่อในที่

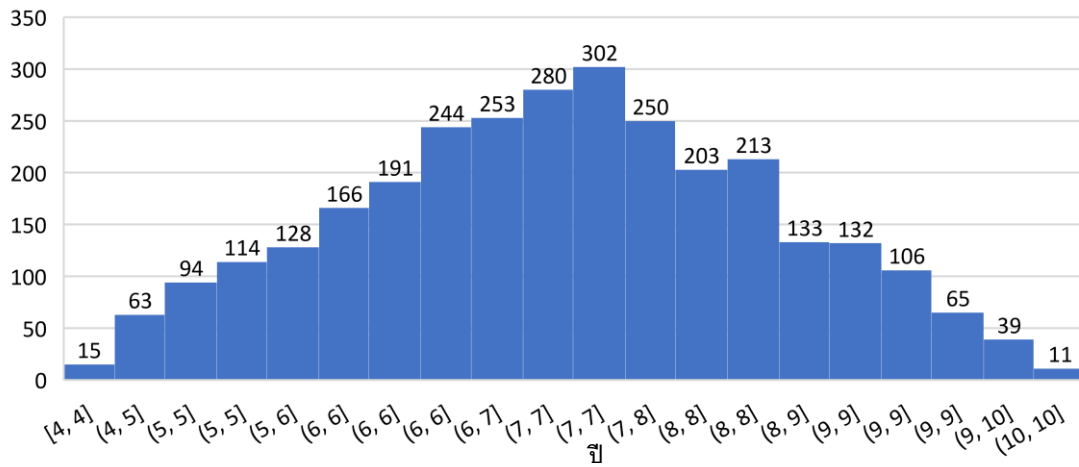


รูปที่ 4.3 Envelope method ของตัวแปร Minor repair ระบบหล่อสำเร็จ

ในส่วนถัดไปจะเป็นการอธิบายวิธีการทำ“Envelope method” โดยรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ ซึ่งจากรูปที่ 4.2 และ 4.3 เพื่อทำการหาระยะเวลาและปริมาณต้นทุนในการซ่อม Minor repair จากสมการทั้ง 3 สมการที่ได้มา หรือกล่าวคือ ขอบเขตระยะเวลาและราคาในการซ่อม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่า Construction cost) จะเป็นตัวแปรและผลลัพธ์ เพื่อให้ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการกระจายตัวของเวลาในการซ่อมและ ปริมาณต้นทุนในการซ่อม Minor repair cost

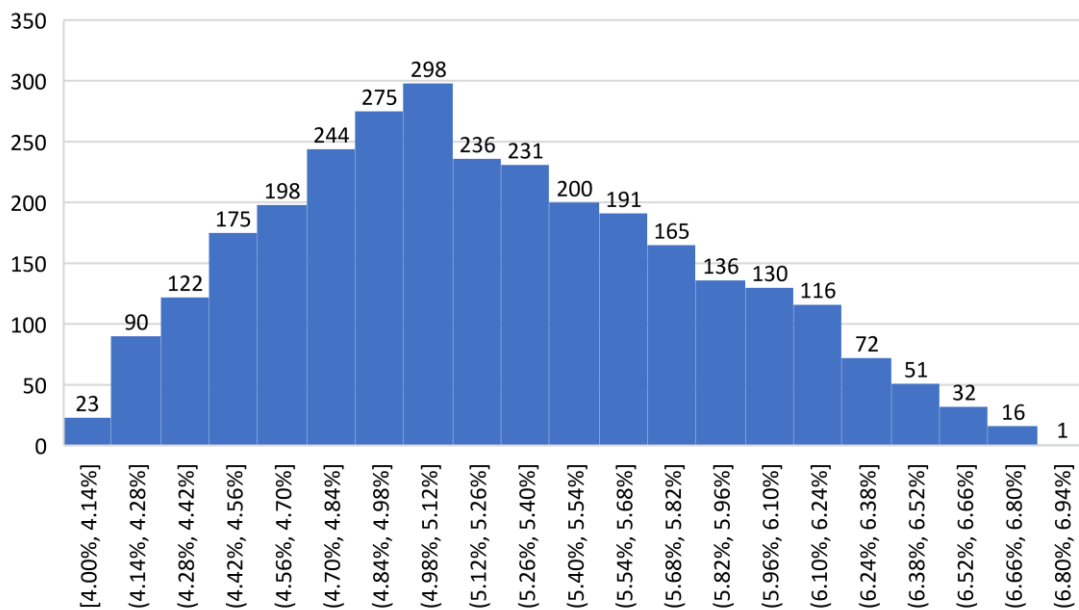
ผู้วิจัยจะทำการจำลองการกระจายตัวของเวลาการซ่อม Minor repair ซึ่งพอได้เวลาที่ใช้ในการซ่อม Minor repair ผู้วิจัยนำค่าเวลาได้กลับไปแทนสมการ 3 สมการที่เป็นขอบเขตของการหาระยะเวลาและปริมาณต้นทุนในการซ่อม Minor repair ดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.7

การกระจายตัวของเวลา (ปี) ในการซ่อมแซม



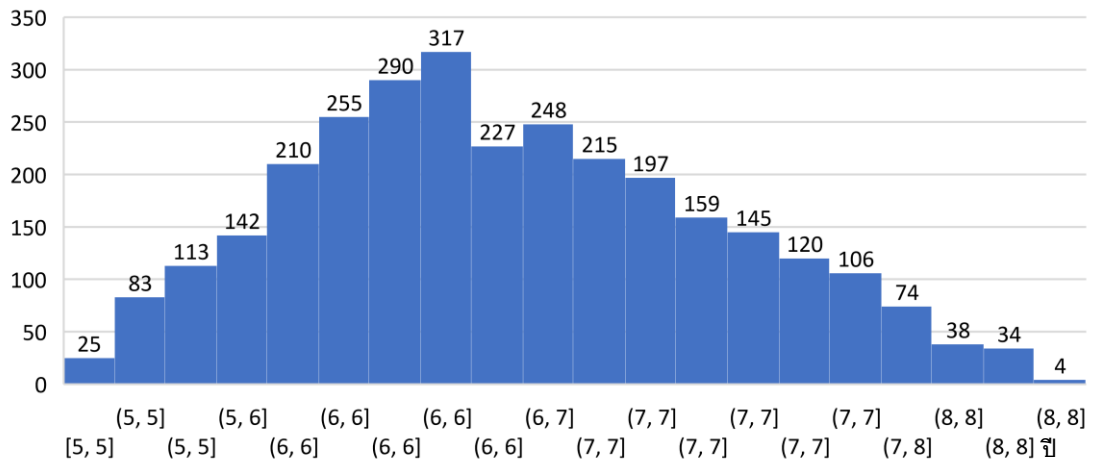
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของเวลา (ปี) ในการซ่อมแซมแบบ Minor repair ของระบบหล่อในที่

การกระจายตัวของต้นทุนในการซ่อมแซม (%C)



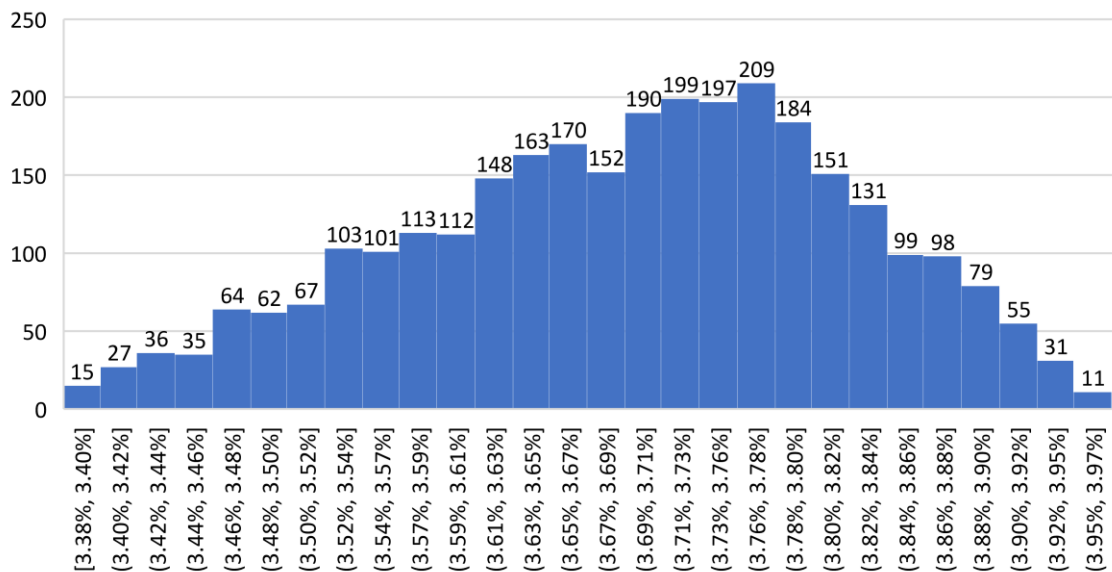
รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของต้นทุนในการซ่อมแซมแบบ Minor repair ของระบบหล่อในที่ (คิดเป็น % ของ Construction cost)

การกระจายตัวของเวลา (ปี) ในการซ่อมแซม



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของเวลา (ปี) ในการซ่อมแบบ Minor repair ของระบบหล่อสำเร็จ

การกระจายตัวของต้นทุนในการซ่อมแซม (%C)



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของต้นทุนในการซ่อมแบบ Minor repair ของระบบหล่อสำเร็จ (คิดเป็น % ของ Construction Cost)

จากรูป 4.2 ผู้วิจัยได้ใช้ Envelope method เพื่อสร้างการกระจายตัวของเวลา (ปี) ในการซ่อมแซมแบบ Minor repair ของระบบหล่อในที่ โดยเลือกใช้การกระจายตัวแบบสามเหลี่ยม (Triangular distribution) ที่อยู่ในช่วงเวลาในการจ่ายค่า Minor repair ทุก 4 – 10 ปี โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7 ปี ส่งผลให้ ส่วนค่าใช้จ่าย Minor repair ที่คิดเป็น % จากตัวแปร Construction cost มีการ

กระจายตัวอยู่ที่ 4% - 6.8% ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.88 % ของตัวแปร Construction cost ที่เป็นมูลค่าเงินปัจจุบัน

ในทำนองเดียวกัน ในระบบหล่อสำเร็จพบว่า ช่วงเวลาในการเกิดของค่า Minor repair มีตั้งแต่ 5 - 8 ปี โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 6 ปี ในส่วนของค่าใช้จ่าย Minor repair ที่คิดเป็นร้อยละของตัวแปร Construction cost มีช่วงการกระจายตัวอยู่ที่ 3.36% - 3.96% โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.75 % ของ Construction cost ที่เป็นมูลค่าเงินปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7

หลังจากทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและสร้างกรอบพื้นที่ในการสุ่ม หรือ ที่เรียกว่า Envelope Area เพื่อหาเวลาที่อาจเกิดค่าใช้จ่ายที่เป็น Minor repair และร้อยละค่าใช้จ่ายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแล้วเสร็จ ผู้วิจัยจะนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณค่าของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้ของโครงการตัวอย่างนั้น ๆ โดยใช้การจำลอง Monte Carlo ต่อไป

2) ข้อมูล Major repair cost

การประมาณการค่าใช้จ่าย Major repair cost เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 ข้อมูล Major repair Cost ของโครงการตัวอย่าง ระบบหล่อสำเร็จ

โครงการ ตัวอย่าง ที่	พื้นที่ ก่อสร้าง (ตร.ม.)	ราคาซ่อม ต่อพื้นที่ (บาท)	Major repair Cost $C_{CP,7,t}$ (บาท)
1	389	8,500.00	$3,306,500.00 * 0.592 * 0.65 = 1,272,341.20$
2	400	10,000.00	$4,000,000.00 * 0.592 * 0.65 = 1,539,200.00$
3	407	10,000.00	$4,070,000.00 * 0.592 * 0.65 = 1,566,136.00$
4	512	10,000.00	$5,120,000.00 * 0.592 * 0.65 = 1,970,176.00$
5	531	10,000.00	$5,310,000.00 * 0.592 * 0.65 = 2,043,288.00$
6	400	10,000.00	$4,000,000.00 * 0.592 * 0.65 = 1,539,200.00$
0.592 เป็นค่า factor ในสัดส่วนของงานที่เป็นโครงสร้างและสถาปัตยกรรม ¹			
0.65 เป็นค่า factor สัดส่วนที่ เจ้าของใหม่ (มือแรก) ที่มารับซื้อราคาช่วงต่อจาก Developer บ้านเดี่ยว ²			

ตารางที่ 4.11 ข้อมูล Major repair Cost ของโครงการตัวอย่าง ระบบหล่อในที่

โครงการ ตัวอย่าง ที่	พื้นที่ ก่อสร้าง (ตร.ม.)	ราคาซ่อม ต่อพื้นที่ (บาท)	Major repair Cost $C_{CIP,t}$ (บาท)
1	389	4,000.00	$1,556,000.00 * 0.592 * 0.65 = 598,748.80$
2	400	4,500.00	$1,800,000.00 * 0.592 * 0.65 = 692,640.00$
3	407	4,500.00	$1,831,500.00 * 0.592 * 0.65 = 704,761.20$
4	512	5,000.00	$2,560,000.00 * 0.592 * 0.65 = 985,088.00$
5	531	5,000.00	$2,655,000.00 * 0.592 * 0.65 = 1,021,644.00$
6	400	4,500.00	$1,800,000.00 * 0.592 * 0.65 = 692,640.00$
0.592 เป็นค่า factor ในสัดส่วนของงานที่เป็นโครงสร้างและสถาปัตยกรรม ¹			
0.65 เป็นค่า factor สัดส่วนที่ เจ้าของใหม่ (มือแรก) ที่มารับซื้อราคาช่วงต่อจาก Developer บ้านเดี่ยว ²			

¹แหล่งที่มา : Measuring and Understanding Home Repair Costs และ American Housing Survey (AHS) database

²แหล่งที่มา : Measuring and Understanding Home Repair Costs และ American Housing Survey (AHS) database

เมื่อทราบค่าที่เป็นไปได้ของตัวแปร Minor repair Cost และ Major repair cost แล้วสามารถทำการประเมินค่าของต้นทุนงานคอนกรีตตลอดอายุการใช้งานของทั้ง 2 ระบบการก่อสร้างได้ โดยในตารางที่ 4.12 เป็นตัวอย่างการแสดงผลการประเมินค่าของต้นทุนงานคอนกรีตในช่วงการใช้งานของระบบหล่อในที่ (CIP) (ปีที่ 2-51) โดยคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน มีค่าประมาณ 2,825,970.58 บาท ส่วนในระบบหล่อสำเร็จก็ใช้แนวทางเดียวกันกับที่ได้แสดงตัวอย่างของระบบหล่อในที่

ตารางที่ 4.12 ต้นทุนในช่วงการใช้งานของโครงการตัวอย่างที่ 1 ของระบบหล่อในที่ (ปีที่ 2-51)

ปีที่	Minor repair	Major repair	Total cost	PV. Total cost
2	-	-	-	-
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
7	168,975.63	-	168,975.63	147,103.45
8	-	-	-	-
9	-	-	-	-
10	-	-	-	-
11	-	-	-	-
12	-	-	-	-
13	-	-	-	-
14	194,099.88	-	194,099.88	147,103.45
15	-	805,837.05	805,837.05	598,748.80
16	-	-	-	-
17	-	-	-	-
18	-	-	-	-
19	-	-	-	-
20	-	-	-	-
21	222,959.75	-	222,959.75	147,103.45
22	-	-	-	-
23	-	-	-	-
24	-	-	-	-
25	-	-	-	-
26	-	-	-	-

27	-	-	-	-
28	256,110.67	-	256,110.67	147,103.45
29	-	-	-	-
30	-	1,084,550.57	1,084,550.57	598,748.80
31	-	-	-	-
32	-	-	-	-
33	-	-	-	-
34	-	-	-	-
35	294,190.66	-	294,190.66	147,103.45
36	-	-	-	-
37	-	-	-	-
38	-	-	-	-
39	-	-	-	-
40	-	-	-	-
41	-	-	-	-
42	337,932.59	-	337,932.59	147,103.45
43	-	-	-	-
44	-	-	-	-
45	-	1,459,662.28	1,459,662.28	598,748.80
46	-	-	-	-
47	-	-	-	-
48	-	-	-	-
49	388,178.33	-	388,178.33	147,103.45
50	-	-	-	-
51	-	-	-	-
Total O&M Cost (บาท)			5,212,497.43	
PV of Total O&M Cost (บาท)			2,825,970.58	

จากตารางที่ 4.12 สามารถสรุปได้ว่า โครงการก่อสร้างตัวอย่างที่ 1 มีองค์ประกอบของ ต้นทุนคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน (Present value : PV) ตลอดอายุการใช้งานของโครงการในกรณีที่เป็น ระบบหล่อในที่ ดังนี้

1. $PV[C_{CIP,pp,t}] = 23,000.00$ บาท พิจารณา ณ ปีที่ 0
 2. $PV[C_{CIP,cp,t}] = 4,581,420.20$ บาท พิจารณา ณ ปีที่ 1
 3. $PV[C_{CIP,OM,t}] = 2,825,970.58$ บาท พิจารณา ณ ปีที่ 2 ถึง 51
- ดังนั้น $PV[LCC]$ หรือต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน = **7,430,390.77 บาท**

ในทำนองเดียวกัน หากต้องการพิจารณาต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการนี้เป็นระบบ หล่อสำเร็จ โครงการก่อสร้างตัวอย่างที่ 1 มีองค์ประกอบของต้นทุนคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน (Present value : PV) ตลอดอายุการใช้งาน ดังนี้

1. $PV[C_{PC,pp,t}] = 23,000.00$ บาท พิจารณา ณ ปีที่ 0
 2. $PV[C_{PC,cp,t}] = 5,883,647.49$ บาท พิจารณา ณ ปีที่ 1
 3. $PV[C_{CIP,OM,t}] = 5,083,077.91$ บาท พิจารณา ณ ปีที่ 2 ถึง 51
- ดังนั้น $PV[LCC]$ หรือต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน = **10,989,725.40 บาท**

สำหรับโครงการตัวอย่างอื่น ๆ ผู้วิจัยได้ทำการสรุปผลการประเมิน LCC ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 สรุปต้นทุนในช่วงเตรียมการและก่อสร้างของแต่ละโครงการ ในระบบหล่อในที่

โครงการ	$PV[C_{CIP,pp,t}]$	$PV[C_{CIP,cp,t}]$	$PV[C_{CIP,OM,t}]$	$PV[LCC]$
1	23,000.00	4,581,420.20	2,825,970.58	7,430,390.77
2	35,000.00	6,121,144.62	3,545,772.82	9,701,917.44
3	20,000.00	7,695,526.92	4,038,555.05	11,754,081.97
4	20,000.00	8,123,416.51	4,815,484.64	13,726,021.98
5	20,000.00	8,611,971.10	5,045,381.11	13,677,352.21
6	25,000.00	5,392,067.70	3,339,535.87	8,756,603.57

ตารางที่ 4.14 สรุปต้นทุนในช่วงเตรียมการและก่อสร้างของแต่ละโครงการ ในระบบหล่อสำเร็จ

โครงการ	PV[$C_{PC,pp,t}$]	PV[$C_{PC,cp,t}$]	PV[$C_{PC,OM,t}$]	PV[LCC]
1	23,000.00	5,883,647.49	5,083,077.91	10,989,725.40
2	35,000.00	7,987,336.17	6,425,084.45	14,447,420.61
3	20,000.00	9,672,749.63	6,937,570.48	16,630,320.11
4	20,000.00	9,887,794.40	8,034,316.21	17,942,110.61
5	20,000.00	10,490,383.02	8,390,915.38	18,901,298.40
6	25,000.00	7,386,425.34	6,279,564.71	14,132,213.42

4.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)

หลังจากเก็บข้อมูลได้แล้วนั้น ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของตัวแปรที่ศึกษาทั้ง 7 ตัวแปร โดยในการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) จะเป็นการเพิ่มและลดตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในระดับค่าเท่า ๆ กัน เช่น $\pm 10\%$ หรือ $\pm 20\%$ จากค่าเฉลี่ยหรือค่าที่ได้ในกรณีฐาน (Base case) ในตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ เพื่อใช้เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงค่านั้นว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าผลลัพธ์ ซึ่งในกรณีนี้ คือ ค่า ต้นทุนงานคอนกรีตตลอดอายุการใช้งานโครงการ (Life – cycle cost, LCC) ว่ามีการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยเพียงใด เพื่อให้ได้กลุ่มของตัวแปรเสี่ยงที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน

ผลการการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของโครงการตัวอย่างแสดงได้ตามตารางที่ 4.15 และ 4.16

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการตัวอย่าง กรณีระบบหล่อในที่

Project1	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	20,700.00	-2,300.00	15,306.86	25,300.00
2.Prelim Cost	875,619.71	-97,291.08	1,070,201.86	97,291.08
3.Construction Cost	2,712,973.53	-301,441.50	3,315,856.54	301,441.50
4.Contingency Cost	217,037.88	-24,115.32	265,268.52	24,115.32
5.Admins	317,647.06	-35,294.12	388,235.29	35,294.12
6.Minor repair	915,823.97	-101,758.22	1,119,340.41	101,758.22
7.Major repair	2,487,110.40	-276,345.60	3,039,801.60	276,345.60
Project 2	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	31,500.00	-3,500.00	38,500.00	3,500.00
2.Prelim Cost	908,823.53	-100,980.39	1,110,784.31	100,980.39
3.Construction Cost	3,867,293.72	-429,699.30	4,726,692.33	429,699.30
4.Contingency Cost	309,383.50	-34,375.94	378,135.39	34,375.94
5.Admins	423,529.41	-47,058.82	517,647.06	47,058.82
6.Minor repair	1,321,067.54	-146,785.28	1,614,638.10	146,785.28
7.Major repair	2,877,120.00	-319,680.00	3,516,480.00	319,680.00
Project 3	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	18,000.00	-2,000.00	22,000.00	2,000.00
2.Prelim Cost	1,027,058.82	-114,117.65	1,255,294.12	114,117.65
3.Construction Cost	5,069,801.84	-563,311.32	6,196,424.47	563,311.32
4.Contingency Cost	405,584.15	-45,064.91	495,713.96	45,064.91
5.Admins	423,529.41	-47,058.82	517,647.06	47,058.82
6.Minor repair	1,731,844.31	-192,427.15	2,116,698.60	192,427.15
7.Major repair	2,927,469.60	-325,274.40	3,578,018.40	325,274.40
Project 4	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	18,000.00	-2,000.00	22,000.00	2,000.00
2.Prelim Cost	1,488,529.41	-165,392.16	1,819,313.73	165,392.16
3.Construction Cost	5,540,317.06	-615,590.78	6,771,498.63	615,590.78
4.Contingency Cost	443,225.36	-49,247.26	541,719.89	49,247.26
5.Admins	529,411.76	-58,823.53	647,058.82	58,823.53
6.Minor repair	1,674,198.58	-186,022.06	2,046,242.71	186,022.06
7.Major repair	4,091,904.00	-454,656.00	5,001,216.00	454,656.00
Project 5	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	18,000.00	-2,000.00	22,000.00	2,000.00
2.Prelim Cost	1,533,185.29	-170,353.92	1,873,893.14	170,353.92
3.Construction Cost	5,217,810.88	-579,756.76	6,377,324.41	579,756.76
4.Contingency Cost	417,424.87	-46,380.54	510,185.95	46,380.54
5.Admins	582,352.94	-64,705.88	711,764.71	64,705.88
6.Minor repair	1,782,404.20	-198,044.91	2,178,494.02	198,044.91
7.Major repair	4,243,752.00	-471,528.00	5,186,808.00	471,528.00
Project 6	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	22,500.00	-2,500.00	27,500.00	2,500.00

Project1	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
2.Prelim Cost	821,840.69	-91,315.63	1,004,471.96	91,315.63
3.Construction Cost	3,323,929.41	-369,325.49	4,062,580.39	369,325.49
4.Contingency Cost	265,914.35	-29,546.04	325,006.43	29,546.04
5.Admins	441,176.47	-49,019.61	539,215.69	49,019.61
6.Minor repair	1,135,454.29	-126,161.59	1,387,777.46	126,161.59
7.Major repair	1,918,080.00	-213,120.00	2,344,320.00	213,120.00

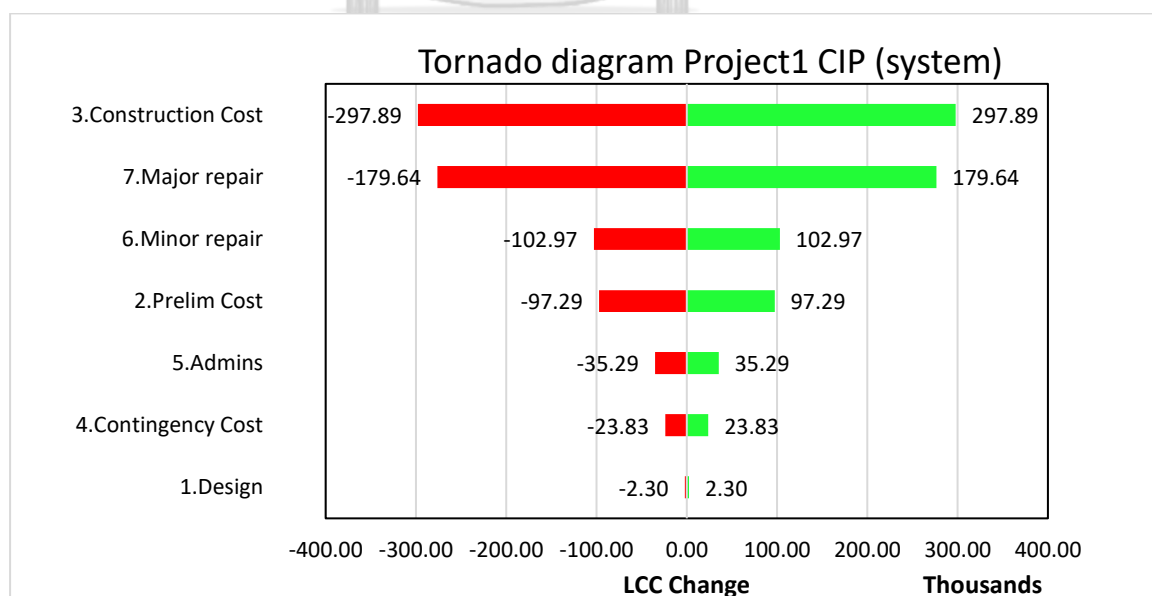
ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการตัวอย่าง กรณีระบบหล่อสำเร็จ

Project 1	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	12,523.80	-1,391.53	15,306.86	1,391.53
2.Prelim Cost	875,619.71	-97,291.08	1,070,201.86	97,291.08
3.Construction Cost	3,830,152.94	-425,572.55	4,681,298.04	425,572.55
4.Contingency Cost	306,412.24	-34,045.80	374,503.84	34,045.80
5.Admins	317,647.06	-35,294.12	388,235.29	35,294.12
6.Minor repair	1,149,045.88	-127,671.76	1,404,389.41	127,671.76
7.Major repair	5,285,109.60	-587,234.40	6,459,578.40	587,234.40
Project 2	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	31,500.00	-3,500.00	38,500.00	3,500.00
2.Prelim Cost	908,823.53	-100,980.39	1,110,784.31	100,980.39
3.Construction Cost	5,422,453.34	-602,494.82	6,627,442.97	602,494.82
4.Contingency Cost	433,796.27	-48,199.59	530,195.44	48,199.59
5.Admins	423,529.41	-47,058.82	517,647.06	47,058.82
6.Minor repair	1,626,736.00	-180,748.44	1,988,232.89	180,748.44
7.Major repair	6,393,600.00	-710,400.00	7,814,400.00	710,400.00
Project 3	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	18,000.00	-2,000.00	22,000.00	2,000.00
2.Prelim Cost	1,027,058.82	-114,117.65	1,255,294.12	114,117.65
3.Construction Cost	6,717,487.44	-746,387.49	8,210,262.43	746,387.49
4.Contingency Cost	537,399.00	-59,711.00	656,820.99	59,711.00
5.Admins	423,529.41	-47,058.82	517,647.06	47,058.82
6.Minor repair	2,015,246.23	-223,916.25	2,463,078.73	223,916.25
7.Major repair	6,505,488.00	-722,832.00	7,951,152.00	722,832.00
Project 4	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	18,000.00	-2,000.00	22,000.00	2,000.00
2.Prelim Cost	1,488,529.41	-165,392.16	1,819,313.73	165,392.16
3.Construction Cost	6,371,364.62	-707,929.40	7,787,223.42	707,929.40
4.Contingency Cost	509,709.17	-56,634.35	622,977.87	56,634.35
5.Admins	529,411.76	-58,823.53	647,058.82	58,823.53
6.Minor repair	1,911,409.39	-212,378.82	2,336,167.03	212,378.82
7.Major repair	8,183,808.00	-909,312.00	10,002,432.00	909,312.00
Project 5	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change

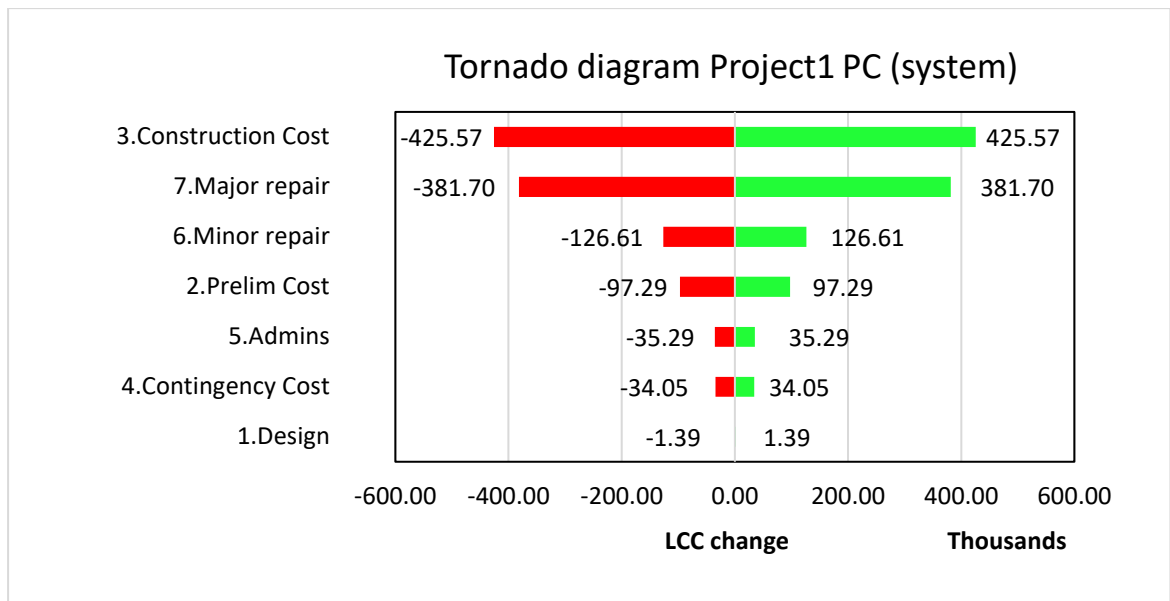
Project 1	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	18,000.00	-2,000.00	22,000.00	2,000.00
2.Prelim Cost	1,533,185.29	-170,353.92	1,873,893.14	170,353.92
3.Construction Cost	6,783,154.15	-753,683.79	8,290,521.74	753,683.79
4.Contingency Cost	542,652.33	-60,294.70	663,241.74	60,294.70
5.Admins	582,352.94	-64,705.88	711,764.71	64,705.88
6.Minor repair	2,034,946.24	-226,105.14	2,487,156.52	226,105.14
7.Major repair	8,487,504.00	-943,056.00	10,373,616.00	943,056.00
Project 6	change value -10%	LCC change	change value +10%	LCC change
1.Design	22,500.00	-2,500.00	27,500.00	2,500.00
2.Prelim Cost	821,840.69	-91,315.63	1,004,471.96	91,315.63
3.Construction Cost	4,985,894.12	-553,988.24	6,093,870.59	553,988.24
4.Contingency Cost	398,871.53	-44,319.06	487,509.65	44,319.06
5.Admins	838,277.51	-93,141.95	1,024,561.40	93,141.95
6.Minor repair	1,495,768.24	-166,196.47	1,828,161.18	166,196.47
7.Major repair	6,393,600.00	-710,400.00	7,814,400.00	710,400.00

4.4 Tornado diagram

หลังจากที่ทำการ Sensitivity Analysis เรียบร้อยแล้วนั้น ผู้วิจัยจะนำผลที่ได้มาสร้าง Tornado diagram หรือ แผนภาพทอร์นาโด โดยแผนภาพทอร์นาโด จะลำดับตัวแปรที่ช่วยบ่งชี้ว่าตัวแปรใดที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงต้นทุนตลอดอายุการใช้งานมากที่สุด และลำดับรอง ๆ ลงมา ตัวอย่างของการสร้างแผนภาพทอร์นาโด เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 แผนภาพทอร์นาโดของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อในที่



รูปที่ 4.9 แผนภาพทอร์นาโดของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อสำเร็จ

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตัวอย่างทอร์นาโด ไตอะแกรมของโครงการตัวอย่างที่ 1 ระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จนั้น ตัวแปรที่เป็น ตัวแปร 3 อันดับแรก นั้น ประกอบไปด้วย

1. Major repair cost ($C_{CP,7,t}$ และ $C_{CIP,7,t}$)
2. Construction cost ($C_{CP,3,t}$ และ $C_{CIP,3,t}$)
3. Minor repair cost ($C_{CP,6,t}$ และ $C_{CIP,6,t}$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับโครงการตัวอย่างอื่น ๆ ผู้วิจัยได้ทำการสรุปผลของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรของโครงการตัวอย่าง

โครงการ	ระบบการก่อสร้าง	ลำดับตัวแปรเสี่ยงที่อ่อนไหว
1.	ผสม	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
2.	หล่อในที่	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
	หล่อสำเร็จ	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
3.	หล่อในที่	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
	หล่อสำเร็จ	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
4.	หล่อในที่	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
	หล่อสำเร็จ	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
5.	หล่อในที่	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
	หล่อสำเร็จ	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
6.	หล่อในที่	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost
	หล่อสำเร็จ	1. Construction cost 2. Major repair cost 3. Minor repair cost

จากตารางที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าทุกโครงการก่อสร้างนั้นมีตัวแปรเสี่ยง 3 อันดับแรกที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานเหมือนกัน จึงเป็นเหตุให้ ผู้วิจัยนั้นใช้ตัวแปรเสี่ยง 3 อันดับแรก ได้แก่

1. Construction cost
2. Major repair cost
3. Minor repair cost

หลังจากที่ผู้วิจัยได้สร้างแผนภาพทอร์นาโดแล้วเสร็จ ผู้วิจัยได้คัดกรองตัวแปรที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการตัวอย่างนั้น ๆ โดยผู้วิจัยจะทำการเลือก ตัวแปร 3 อันดับแรกที่เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการตัวอย่างนั้น ๆ มากที่สุด เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถนำตัวแปรที่ถูกคัดกรองนั้น มาวิเคราะห์หาช่วงค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน โดยใช้วิธีการจำลอง Monte Carlo ดังมีรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

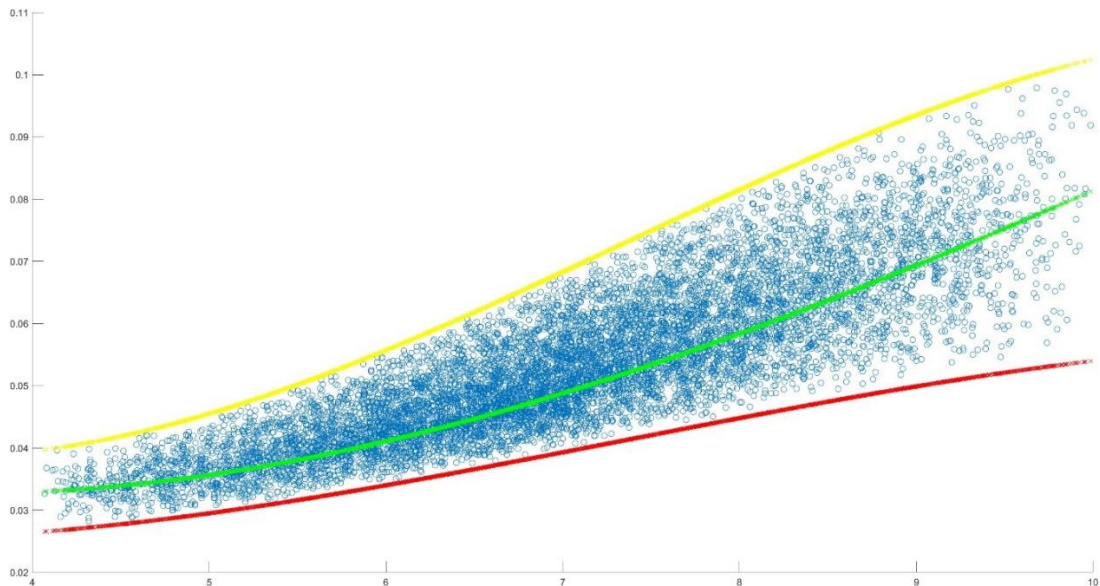
4.5 ผลการจำลองโดยวิธี Monte Carlo

ในการสร้างแบบจำลองของการกระจายตัวของเวลาในการเกิดขึ้นของกิจกรรม Minor repair และ การกระจายตัวของค่าใช้จ่ายที่เป็นไปได้ของตัวแปร Minor repair cost เพื่อให้ได้การกระจายตัวของค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน ผู้วิจัยนั้นได้เลือกใช้ โปรแกรม MATHLAB R2022b ในการสร้างแบบจำลองมอนติคาร์โล

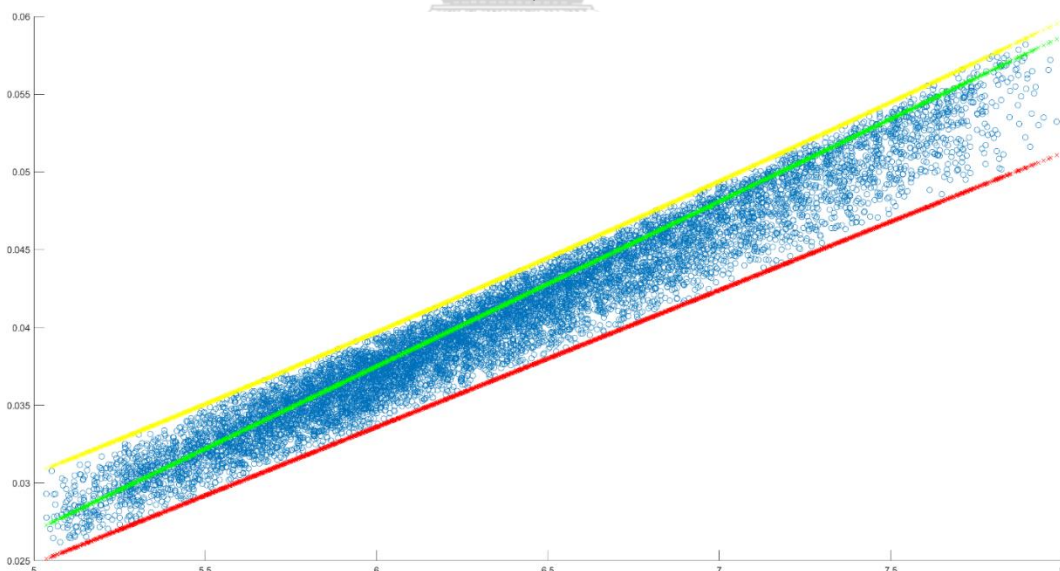
จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า วิธี Envelope method ที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการหาการกระจายตัวของเวลาในการจ่ายค่าซ่อม Minor repair cost และ การกระจายตัวของค่าใช้จ่ายของตัวแปร Minor repair cost ที่มาจากการสร้างสมการพหุคูณ 3 สมการ แต่นั่นเป็นเพียงแค่ 1 ผลลัพธ์ของการหาค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดการใช้งาน ดังนั้นเพื่อให้ผลลัพธ์ของการหาค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดการใช้นั้นมีความแม่นยำมากขึ้น ผู้วิจัยจึงต้องเลือกเวลาอื่นๆใน Envelope ของ สมการพหุคูณ 3 สมการ ของการจ่ายค่าซ่อม Minor repair cost และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆของตัวแปร Minor repair cost ที่มาจากการสร้างสมการพหุคูณ 3 สมการ ให้ได้ผลลัพธ์ของการหาค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดการใช้นั้นมากขึ้น

นั่นจึงเป็นเหตุให้ผู้วิจัยนั้นต้องสร้างแบบจำลองของการกระจายตัวของเวลาในการค่า Minor repair cost และ การกระจายตัวของค่าใช้จ่ายของตัวแปร Minor repair cost เพื่อให้ได้การกระจายตัวของค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน ด้วยการจำลองโดยวิธี Monte Carlo ทั้งระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ

ผลลัพธ์ของต้นทุนในการซ่อม Minor repair cost จากการสุ่มความถี่ของเวลาในการจ่ายค่าซ่อมแซม Minor repair cost 10,000 ครั้ง ภายใต้ของเขตของสมการพหุคูณ 3 สมการของระบบหล่อในที่และหล่อสำเร็จ เป็นดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ผลการสุ่มช่วงเวลาและต้นทุนของกิจกรรม Minor repair ของระบบหล่อในที่ โดยวิธี Envelope method

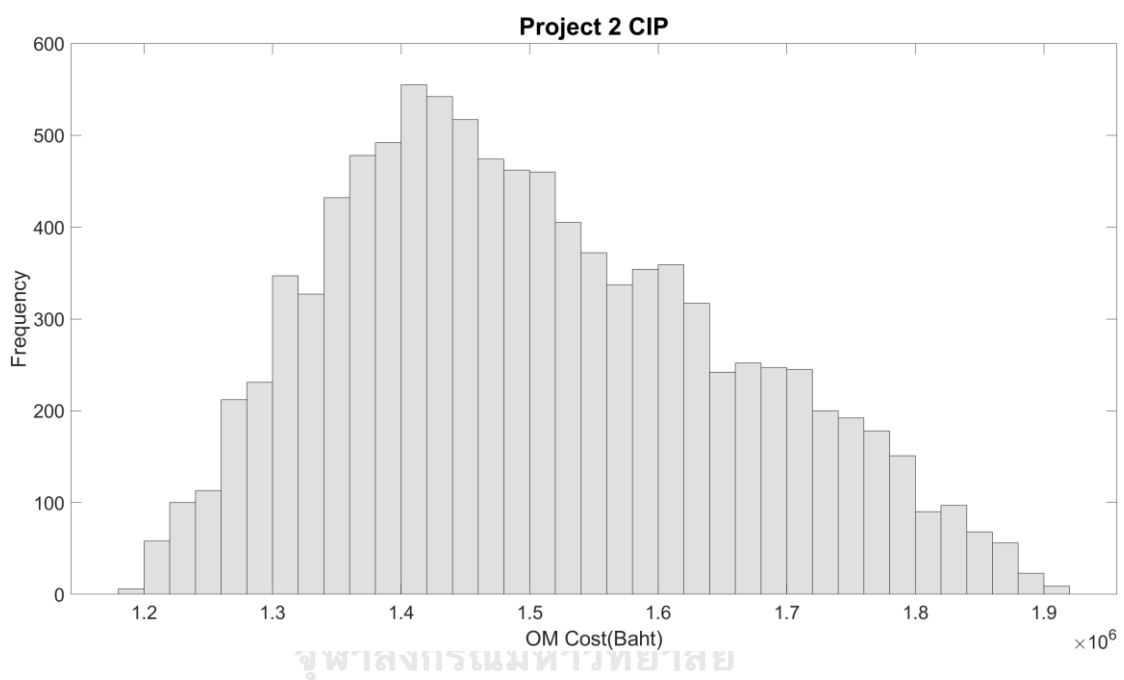


รูปที่ 4.11 ผลการสุ่มช่วงเวลาและต้นทุนของกิจกรรม Minor repair ของระบบหล่อสำเร็จ โดยวิธี Envelope method

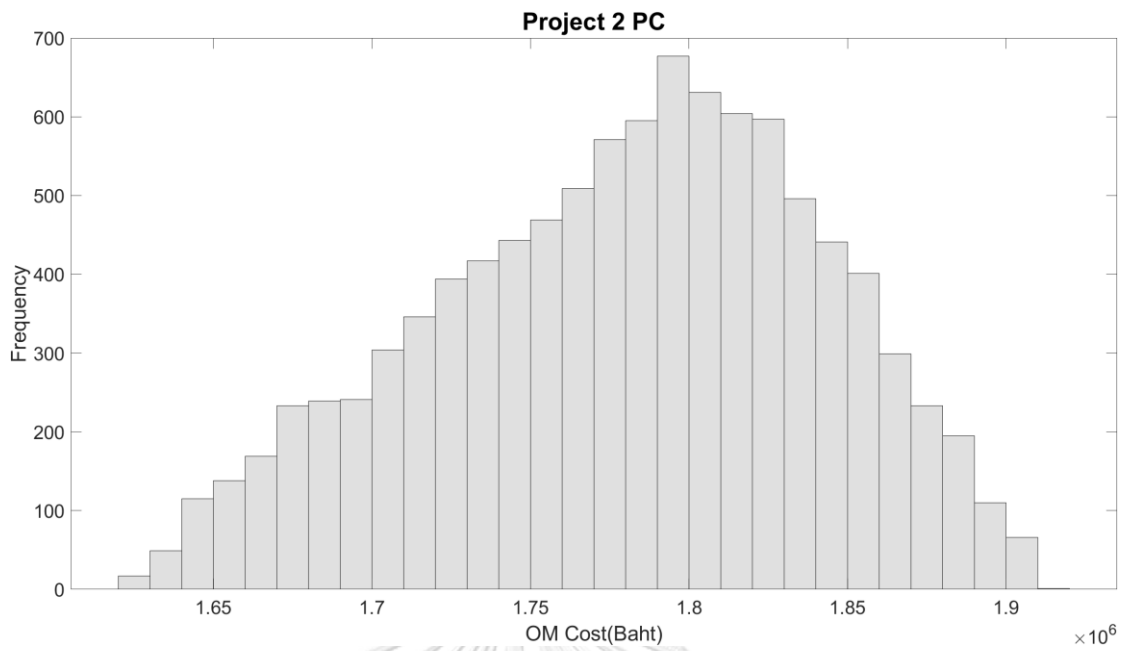
หลังจากได้ผลลัพธ์ของต้นทุนในการซ่อม Minor repair cost จากการสุ่มความถี่ของเวลาในการจ่ายค่าซ่อมแซม Preventive maintenance cost 10,000 ครั้งจากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แล้ว

นั้น ผู้วิจัยจะสามารถสร้างกราฟฮิสโตแกรมการกระจายตัวของค่าใช้จ่าย Minor repair cost ดังรูป 4.12 และ 4.13 ของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จตามลำดับ

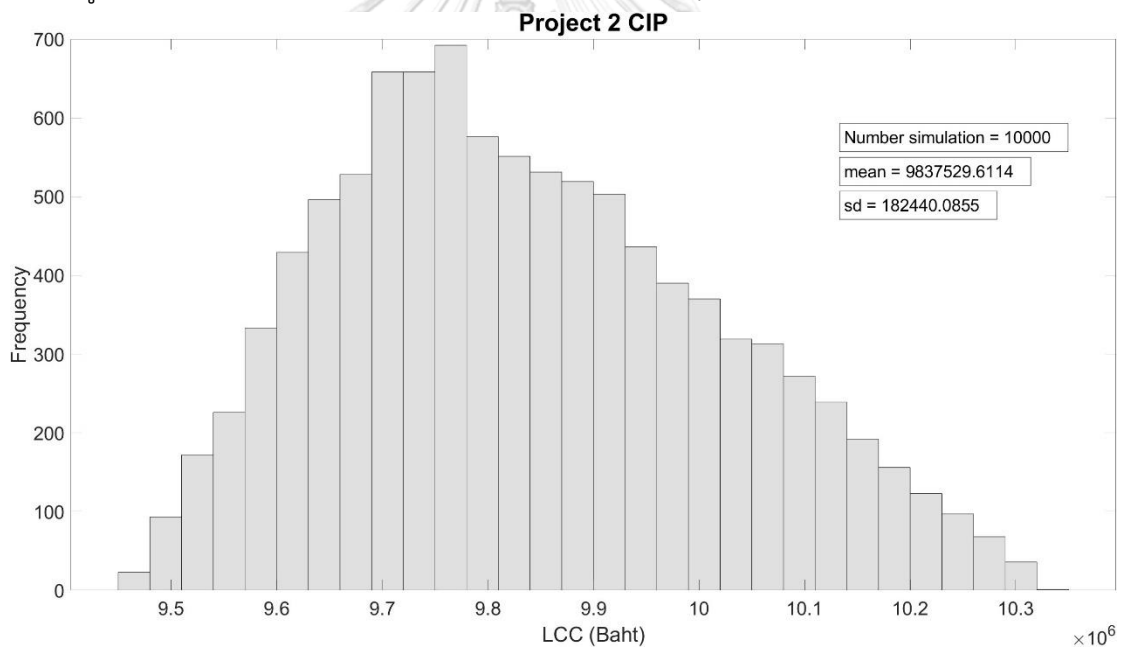
ดังนั้น จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 ที่ทราบถึงการกระจายตัวของค่าใช้จ่าย Minor repair cost แล้วนั้น จึงทำให้ผู้วิจัยนั้นสามารถหาช่วงหรือค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Range of possible LCCs) ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟฮิสโตแกรม โดยการนำการกระจายตัวของค่าใช้จ่าย Minor repair cost ไปรวมกับค่าคงที่ได้แก่ Major repair cost และ Construction cost โดยทำทุกโครงการตัวอย่าง ดังรูป 4.14 และ 4.15



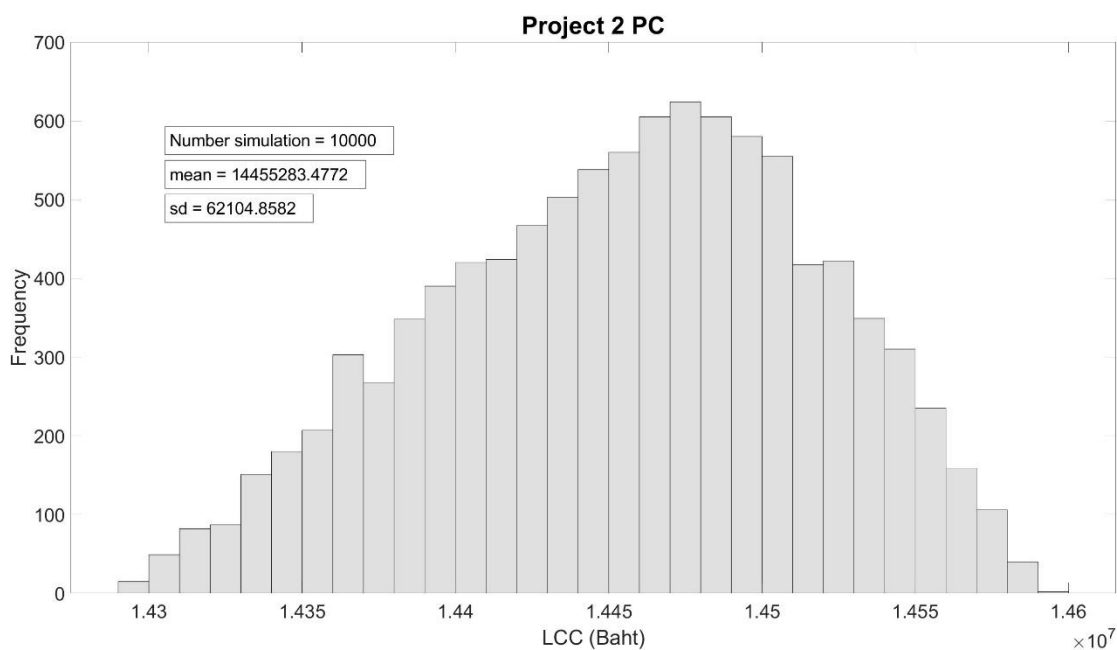
รูปที่ 4.12 กราฟการกระจายตัวของค่าใช้จ่าย Minor repair cost ของระบบหล่อในที่



รูปที่ 4.13 กราฟการกระจายตัวของค่าใช้จ่าย Minor repair cost ของระบบหล่อสำเร็จ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการตัวอย่างที่ 2 ระบบหล่อในที่



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงของค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการตัวอย่างที่ 2 ระบบหล่อสำเร็จ

4.6 สรุปผลการประเมินเปรียบเทียบด้านต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของทั้ง 2 ระบบการก่อสร้าง

จากที่ได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากโครงการตัวอย่างทั้ง 6 โครงการ และได้ประเมินวิเคราะห์หาค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบการก่อสร้างคอนกรีตทั้ง 2 ระบบ และการประเมินช่วงของต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ที่เป็นไปได้จากต้นทุนในอนาคตที่อาจเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากความไม่แน่นอน โดยใช้วิธี Monte Carlo simulation และ Envelope method โดยในการศึกษานี้ พิจารณาความไม่แน่นอนของต้นทุน Minor repair cost เท่านั้น

โดยสรุปผลการประเมินเปรียบเทียบด้านต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของทั้ง 2 ระบบการก่อสร้าง เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.18 และ 4.19

ตารางที่ 4.18 ผลการประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบคอนกรีตหล่อในที่

โครงการตัวอย่าง	ช่วงของ LCC ที่เป็นไปได้	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	ใช้ระบบการก่อสร้างแบบผสมซึ่งยังเก็บข้อมูลช่วงการใช้งานไม่ครบ		
2	9.22 - 10.12 ล้านบาท	9.83 ล้านบาท	182,440.08 บาท
3	11.36 - 12.26 ล้านบาท	11.76 ล้านบาท	192,846.52 บาท
4	13.41 - 14.11 ล้านบาท	13.73 ล้านบาท	136,817.88 บาท
5	13.39 - 13.99 ล้านบาท	13.68 ล้านบาท	135,223.31 บาท
6	8.32 - 9.22 ล้านบาท	8.76 ล้านบาท	189,024.56 บาท

ตารางที่ 4.19 ผลการประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้ (LCC) ของระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ

โครงการตัวอย่าง	ช่วงของ LCC ที่เป็นไปได้	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	ใช้ระบบการก่อสร้างแบบผสมซึ่งยังเก็บข้อมูลช่วงการใช้งานไม่ครบ		
2	14.22 - 14.57 ล้านบาท	14.45 ล้านบาท	62,104.85 บาท
3	16.50 - 16.75 ล้านบาท	16.63 ล้านบาท	60,730.91 บาท
4	17.76 - 18.06 ล้านบาท	17.94 ล้านบาท	64,395.85 บาท
5	18.73 - 19.03 ล้านบาท	18.90 ล้านบาท	60,574.21 บาท
6	13.98 - 14.23 ล้านบาท	14.13 ล้านบาท	60,512.08 บาท

จากตารางที่ 4.18 สำหรับการหาค่า Life – cycle cost (LCC) ที่เป็นไปได้ของระบบหล่อในที่นั้นพบว่า

โครงการตัวอย่างที่ 2 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่ 9.83 ล้านบาท
 โครงการตัวอย่างที่ 3 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่ 11.76 ล้านบาท
 โครงการตัวอย่างที่ 4 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่ 13.73 ล้านบาท
 โครงการตัวอย่างที่ 5 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่ 13.68 ล้านบาท
 โครงการตัวอย่างที่ 6 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่ 8.76 ล้านบาท

จากตารางที่ 4.19 สำหรับการหาค่า Life – cycle cost (LCC) ที่เป็นไปได้ของระบบหล่อสำเร็จนั้นพบว่า

โครงการตัวอย่างที่ 2 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่ 14.45 ล้านบาท

โครงการตัวอย่างที่ 3 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่	16.63 ล้านบาท
โครงการตัวอย่างที่ 4 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่	17.94 ล้านบาท
โครงการตัวอย่างที่ 5 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่	18.90 ล้านบาท
โครงการตัวอย่างที่ 6 ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้อยู่ที่	14.13 ล้านบาท

หลังจากการใช้แบบจำลองมอนติคาร์โลทำการจำลองหาค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน ทั้ง 5 โครงการตัวอย่าง (ไม่นับโครงการตัวอย่างที่ 1 ที่เป็นระบบแบบผสม เนื่องจากตอนไปเก็บข้อมูลผู้วิจัยยังไม่สามารถเก็บข้อมูลในส่วนของ O&M ได้ครบถ้วน) นั้น พบว่าอัตราส่วนของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้ของระบบหล่อในที่ต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จนั้น (CIP/PC) อยู่ที่ 0.60 – 0.73 ซึ่งจากอัตราส่วนที่ได้ทำมาสำหรับการเลือกใช้ระบบการก่อสร้างในโครงการตัวอย่าง (โดยไม่คำนึงถึงมิติเวลาในช่วงการก่อสร้าง) นั้นอาจส่งผลให้เจ้าของโครงการเลือกใช้ระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่ในอนาคตแทน เพราะระบบหล่อในที่มีต้นทุนตลอดอายุการงานน้อยกว่า

จากการวิจัยครั้งนี้ถือว่าเป็นการประมาณค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของผู้วิจัยที่ค่อนข้างหายากภายใต้ตัวแปรที่ส่งผลต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว ซึ่งมีสาเหตุมาจาก การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบของระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่และหล่อสำเร็จโดยไม่คำนึงถึงมิติเวลาและใช้เวลาในการก่อสร้าง 1 ปี เท่ากัน จึงเป็นเหตุให้ต้นทุนตลอดอายุการงานของระบบหล่อในที่นั้นน้อยกว่าต้นทุนตลอดอายุการงานของระบบหล่อสำเร็จ

บทที่ 5

การประเมินเปรียบเทียบด้านปริมาณสารคาร์บอน

การวิจัยและการประเมินเปรียบเทียบด้านปริมาณสารคาร์บอนที่ปล่อยออกมาจากระบบการก่อสร้างคอนกรีตทั้ง 2 ระบบ โดยเป็นปริมาณตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของโครงการ ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของระยะทางในการขนส่งแต่ละโครงการก่อสร้างตัวอย่างทั้ง 6 โครงการ และใช้วิธีการประเมินปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากงานวิจัยของ Han et al. (2022) ซึ่งรวมไปถึงค่า factor สำหรับการขนส่งจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก โดยมีรายละเอียดในการประเมินเปรียบเทียบด้านปริมาณสารคาร์บอนดังนี้

5.1 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์การประมาณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวแปรในโมเดลการคำนวณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการบ่งบอกถึงช่วงของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแหล่งที่มาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรของการวัดเป็นดังนี้

PC คือ ชั้นส่วนของสิ่งก่อสร้างที่ใช้วัสดุการก่อสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete)

CIP คือ ชั้นส่วนของสิ่งก่อสร้างที่ใช้วัสดุการก่อสร้างแบบคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place)

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 จากวัตถุดิบโดยตรง

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

ดังนั้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยเขียนได้เป็นดังนี้

$$E_{i-j} [PC] \text{ และ } E_{i-j} [CIP]$$

สำหรับชั้นส่วนของสิ่งก่อสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete) และแบบคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place concrete) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง

ของกระบวนการของงานคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete) และงานคอนกรีตหล่อในที่ (Cast-in place concrete) เขียนได้เป็นดังนี้

E_{1-1} คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากวัตถุดิบโดยตรง ในช่วงเตรียมการ โดยแบ่งออกได้เป็น

$E_{1-1}[PC]$ คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น โดยตรงในช่วงเตรียมการ

$E_{1-1}[CIP]$ คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมาจากคอนกรีตหล่อในที่นั้น โดยตรง ในช่วงเตรียมการ

5.1.1 โมเดลการวัดปริมาณก๊าซ CO₂ ที่มาจากวัสดุโดยตรง

ปริมาณก๊าซ CO₂ ที่มาจากวัสดุโดยตรง ประมาณได้โดยใช้วิธี Coefficient method (Han et al., 2022) ซึ่งมีสมการจากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เป็นดังนี้

$$E_{i-1} = \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^n \left[\frac{A_p}{A'_p} \times M_{pq} \times f_q \right] \quad (3.5)$$

โดยที่ $p \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 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 ; f_q และ คือ Carbon emission factor จากวัตถุดิบ q

5.1.2 โมเดลการวัดปริมาณก๊าซ CO₂ ที่มาจากเครื่องจักร

ส่วนปริมาณก๊าซ CO₂ ที่มาจากเครื่องจักร ประมาณได้โดยใช้วิธี Coefficient method (Han et al., 2022) ซึ่งมีสมการจากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เป็นดังนี้

$$E_{i-2} = \sum_{p=1}^m \sum_{q'=1}^{n'} \left[\frac{A_p}{A'_p} \times M_{pq'} \times f_{q'} \times C_{q'} \right] \quad (3.6)$$

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

เนื่องด้วย การพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จนั้น มีการใช้วัสดุที่เป็นคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันและปริมาณคอนกรีตที่ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานให้ใช้ปริมาณเท่ากันในทั้ง 2 มุมมอง เป็นผลให้ค่า Embodied CO₂ มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในมุมมองระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ ดังนั้นเพื่อต้องการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากก๊าซ CO₂ ระยะทางการขนส่งคอนกรีตของทั้ง 2 ระบบจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการคำนวณค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยค่าแฟกเตอร์ (Factor) ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของวัสดุและการขนส่ง เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่า Factor ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของวัสดุและการขนส่ง

ลำดับที่	รายการ	ค่า Factor	หน่วย	แหล่งข้อมูล
1	รถบรรทุกซีเมนต์แบบโม้ 10 ล้อ 100% loading (คิดขาไป)	0.0611	kgCO ₂ e/km	[1.]
2	รถบรรทุกซีเมนต์แบบโม้ 10 ล้อ 0% loading (คิดขากลับ)	0.7382	kgCO ₂ e/km	[1.]
3	รถกระบะบรรทุกฟุ้ง 18 ล้อ 100% loading (คิดขาไป)	0.2150	kgCO ₂ e/km	[1.]
4	รถกระบะบรรทุกฟุ้ง 18 ล้อ 25% loading (คิดขากลับ)	0.0536	kgCO ₂ e/km	[1.]
5	f_q จากคอนกรีต	347.6430	kgCO ₂ e/m ³	[2.]
6	A_p ของคอนกรีต (Stair)	37.50	m ³	[2.]
7	A_p ของคอนกรีต (Beam)	626.66	m ³	[2.]
8	A_p ของคอนกรีต (Slab)	264.32	m ³	[2.]
9	A_p , Concrete engineering	10.00	m ³	[2.]
10	M_{pq} ของคอนกรีต	24.88	m ³	[2.]

[1.] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.)

[2.] Han, Q., Chang, J., Liu, G., & Zhang, H. (2022). The Carbon Emission Assessment of a Building with Different Prefabrication Rates in the Construction Stage.

5.2 ข้อมูลระยะทางการส่งและขอบเขตในการวัดของแต่ละโครงการ

ข้อมูลระยะทางการส่งของแต่ละโครงการตัวอย่าง ของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ เป็นดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลระยะทางการขนส่งของโครงการตัวอย่างในระบบหล่อในที่ (CIP)

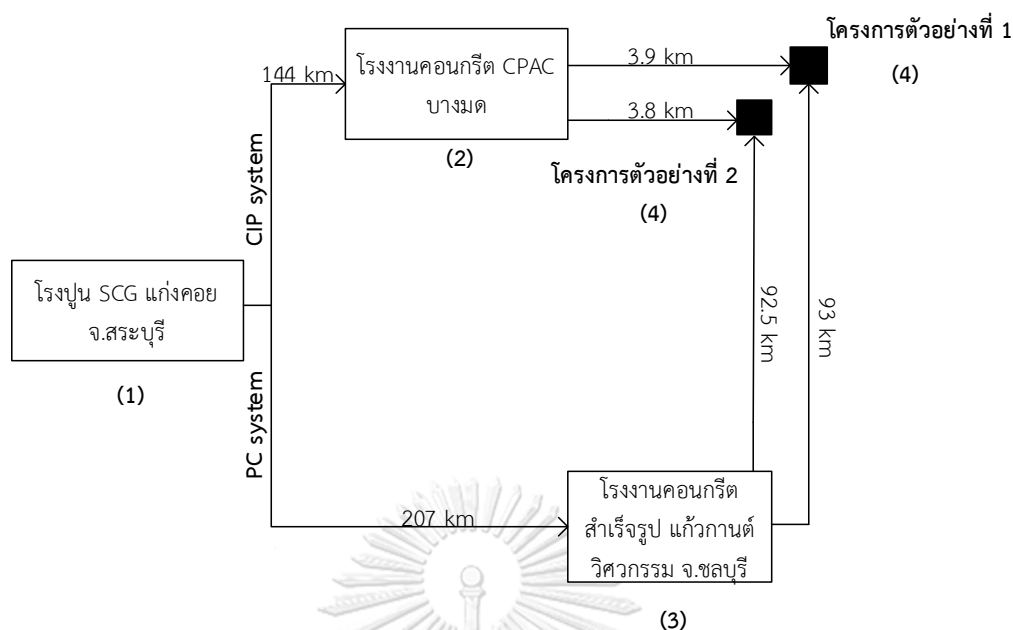
ระบบหล่อในที่				
โครงการ ตัวอย่าง	โรงงานผลิต ปูนซีเมนต์	ระยะทางไปโรงงาน คอนกรีตผสมเสร็จ	โรงงานคอนกรีต ผสมเสร็จ	ระยะทางไป โครงการก่อสร้าง
1	SCG แก่งคอย	144 km	CPAC บางมด	3.9 km
2	SCG แก่งคอย	144 km	CPAC บางมด	3.8 km
3	SCG แก่งคอย	121 km	CPAC รามอินทรา 87	9.5 km
4	นครหลวง แก่งคอย	134 km	อินทรี บังพลัด	18.3 km
5	SCG แก่งคอย	121 km	CPAC รามอินทรา 87	7.1 km
6	SCG แก่งคอย	140 km	CPAC ทวีวัฒนา	4.9 km

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลระยะทางการขนส่งของโครงการตัวอย่างในระบบหล่อสำเร็จ (PC)

ระบบหล่อสำเร็จ				
โครงการ ตัวอย่าง	โรงงานผลิต ปูนซีเมนต์	ระยะทางไปโรงงานผลิต คอนกรีตสำเร็จรูป	โรงงานผลิตคอนกรีต สำเร็จรูป	ระยะทางไป โครงการก่อสร้าง
1	SCG แก่งคอย	207 km	แก้วกานต์ วิศวกรรม	93 km
2	SCG แก่งคอย	207 km	แก้วกานต์ วิศวกรรม	92.5 km
3	SCG แก่งคอย	207 km	แก้วกานต์ วิศวกรรม	102 km
4	นครหลวง แก่งคอย	214 km	แก้วกานต์ วิศวกรรม	130 km
5	SCG แก่งคอย	207 km	แก้วกานต์ วิศวกรรม	96 km
6	SCG แก่งคอย	207 km	แก้วกานต์ วิศวกรรม	126 km

ในส่วนขอบเขตของการวัดปริมาณหรือการพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Boundary of measurement) ของกิจกรรมการขนส่งจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ถึงโครงการก่อสร้างเท่านั้น ผู้วิจัยกำหนดขอบเขตของการวัดไว้ที่การวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของคอนกรีตในส่วนที่เป็นของซีเมนต์เท่านั้น เนื่องจากองค์ประกอบในส่วนอื่น ๆ นั้นการเก็บรวบรวมข้อมูลจำเป็นต้องใช้เวลานาน และยากต่อเก็บข้อมูลสนาม

ขอบเขตด้านระยะทางการขนส่งของการวัดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Boundary of measurement) ในการศึกษานี้เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างเส้นทางการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการขนส่ง

จากรูปที่ 5.1 การวัดระยะทางเพื่อใช้ในคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการขนส่งของโครงการตัวอย่างที่ 1 และ 2 จะวัดตั้งแต่แหล่งผลิตไปถึงสถานที่ก่อสร้างโครงการ โดยในแต่ละระบบการก่อสร้างมีเส้นทางการขนส่งที่แตกต่างกัน เช่น ในรูปที่ 5.1 เส้นทางการขนส่งสำหรับระบบหล่อในที่ จะเป็นการขนส่งจาก (1) โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → (2) โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ → (4) โครงการก่อสร้าง และสำหรับระบบหล่อสำเร็จ จะเป็นการขนส่งจาก (1) โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → (3) โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป → (4) โครงการก่อสร้าง เป็นต้น

5.3 การพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เนื่องด้วย การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จนั้น มีการใช้วัตถุดิบที่เป็นคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ดังนั้นโครงการตัวอย่างจึงมีค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมไว้ในขั้นตอนการผลิตเท่ากัน ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมในขั้นตอนการผลิต

Embodied CO ₂ component	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kgCO ₂ e)
E_{1-1} stair	32,433.88
E_{1-1} beam	542,000.39
E_{1-1} slab	228,611.28
Total E_{1-1} (Embodied CO₂)	803,045.55

ในส่วนการพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากกระบวนการขนส่ง ของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ ผู้วิจัยได้แสดงผลการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังตารางที่ 5.4 ถึง ตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณรอบในการขนส่งของระบบหล่อในที่ (โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ)

ระบบหล่อในที่			
โครงการตัวอย่าง	ปริมาตรคอนกรีตของโครงการตัวอย่าง	แปลงเป็นน้ำหนัก (kg)	จำนวนครั้งที่ต้องส่ง (ครั้ง)
1 (ผสม)	38.30	91,920.00	2.00
2	124.00	297,600.00	7.00
3	126.00	302,400.00	7.00
4	163.00	391,200.00	9.00
5	202.00	484,800.00	11.00
6	131.00	314,400.00	7.00

**รถกระบะบรรทุกฟุ้ง 18 ล้อ ใช้น้ำหนักได้ 47 ตัน, ปริมาตรคอนกรีตของโครงการตัวอย่าง จาก BOQ, คอนกรีต 1 m³ = 2,400 kg

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณรอบในการขนส่งของระบบหล่อสำเร็จ (โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ →
โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป)

ระบบหล่อสำเร็จ			
โครงการตัวอย่าง	ปริมาตรคอนกรีตของโครงการตัวอย่าง	แปลงเป็นน้ำหนัก (kg)	จำนวนครั้งที่ต้องส่ง (ครั้ง)
1 (ผสม)	54.70	131,280.00	3.00
2	124.00	297,600.00	7.00
3	126.00	302,400.00	7.00
4	163.00	391,200.00	9.00
5	202.00	484,800.00	11.00
6	131.00	314,400.00	7.00

****รถกระบะบรรทุกพ่วง 18 ล้อ รับน้ำหนักได้ 47 ตัน, ปริมาตรคอนกรีตของโครงการตัวอย่าง จาก BOQ, คอนกรีต 1 m³ = 2,400 kg**

ตารางที่ 5.6 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง (ต่อ 1 รอบ)
(โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการขนส่งของระบบหล่อในที่			
โครงการตัวอย่าง	ขาไป (kgCO ₂ e)	ขากลับ (kgCO ₂ e)	Total $E_{transport}$ (kgCO ₂ e)
1 (ผสม)	30.96	7.72	38.68
2	30.96	7.72	38.68
3	26.015	6.49	32.50
4	28.81	7.18	35.99
5	26.015	6.49	32.50
6	30.1	7.50	37.60

ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง (ต่อ 1 รอบ)
(โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการขนส่งของระบบหล่อสำเร็จ			
โครงการตัวอย่าง	ขาไป (kgCO ₂ e)	ขากลับ (kgCO ₂ e)	Total $E_{transport}$ (kgCO ₂ e)
1 (ผสม)	44.51	11.10	55.60
2	44.51	11.10	55.60
3	44.51	11.10	55.60
4	46.01	11.47	57.48
5	44.51	11.10	55.60
6	44.51	11.10	55.60

ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง
(โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ) และ (โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ → โรงงาน
คอนกรีตสำเร็จรูป)

โครงการตัวอย่าง	ระบบการก่อสร้าง	
	Total $E_{transport}$ หล่อในที่ (kgCO ₂ e)	Total $E_{transport}$ หล่อสำเร็จ (kgCO ₂ e)
1 (ผสม)	77.36	166.80
2	270.75	389.20
3	227.50	389.20
4	323.93	517.32
5	357.51	611.60
6	263.23	389.20

ส่วนการพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากกระบวนการขนส่ง (โรงงาน
คอนกรีต → โครงการก่อสร้าง) ของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ ผู้วิจัยได้แสดงผลการ
คำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังตารางที่ 5.9 ถึง ตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.9 ผลการคำนวณรอบในการขนส่งของระบบหล่อในที่ (โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ →
โครงการก่อสร้าง)

ระบบหล่อในที่		
โครงการตัวอย่าง	ปริมาตรคอนกรีตของโครงการตัวอย่าง (ลบ.ม.)	จำนวนครั้งที่ต้องส่ง (ครั้ง)
1 (ผสม)	38.30	8.00
2	124.00	25.00
3	126.00	26.00
4	163.00	33.00
5	202.00	41.00
6	131.00	27.00
**รถบรรทุกซีเมนต์จุได้ 5 ลบ.ม.		

ตารางที่ 5.10 ผลการคำนวณรอบในการขนส่งของระบบหล่อสำเร็จ (โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป →
โครงการก่อสร้าง)

ระบบหล่อสำเร็จ			
โครงการตัวอย่าง	ปริมาตรคอนกรีตของโครงการตัวอย่าง	แปลงเป็นน้ำหนัก (kg)	จำนวนครั้งที่ต้องส่ง (ครั้ง)
1 (ผสม)	54.70	131,280.00	3.00
2	124.00	297,600.00	7.00
3	126.00	302,400.00	7.00
4	163.00	391,200.00	9.00
5	202.00	484,800.00	11.00
6	131.00	314,400.00	7.00
**รถกระบะบรรทุกฟุ้ง 18 ล้อ รับน้ำหนักได้ 47 ตัน, ปริมาตรคอนกรีตของโครงการตัวอย่าง จาก BOQ, คอนกรีต 1 m³ = 2,400 kg			

ตารางที่ 5.11 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง (ต่อ 1 รอบ)
(โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ →โครงการก่อสร้าง)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการขนส่งของระบบหล่อในที่			
โครงการตัวอย่าง	ขาไป(kgCO ₂ e)	ขากลับ(kgCO ₂ e)	Total $E_{transport}$ (kgCO ₂ e)
1(ผสม)	0.24	2.88	3.12
2	0.23	2.81	3.04
3	0.58	7.01	7.59
4	1.12	13.51	14.63
5	0.43	5.24	5.68
6	0.30	3.62	3.92

ตารางที่ 5.12 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง (ต่อ 1 รอบ)
(โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป →site)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการขนส่งของระบบหล่อสำเร็จ			
โครงการตัวอย่าง	ขาไป(kgCO ₂ e)	ขากลับ(kgCO ₂ e)	Total $E_{transport}$ (kgCO ₂ e)
1(ผสม)	22.15	5.52	27.67
2	22.15	5.52	27.67
3	21.93	5.47	27.40
4	27.95	6.97	34.92
5	20.64	5.15	25.79
6	27.09	6.75	33.84

ตารางที่ 5.13 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่ง

(โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ→โครงการก่อสร้าง) และ (โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป→โครงการก่อสร้าง)

โครงการ ตัวอย่าง	ระบบการก่อสร้าง	
	Total $E_{transport}$ หล่อในที่ (kgCO ₂ e)	Total $E_{transport}$ หล่อสำเร็จ (kgCO ₂ e)
1 (ผสม)	24.94	74.94
2	75.93	173.92
3	197.43	191.78
4	482.70	314.26
5	232.68	283.64
6	105.75	236.91

ส่วนผลการวิจัยจากการพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากกระบวนการขนส่งทั้งหมด (โรงงานผลิตปูนซีเมนต์→โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ→site) ของระบบหล่อในที่ และ (โรงงานผลิตปูนซีเมนต์→โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป→site) ของระบบหล่อสำเร็จ ผู้วิจัยจะแสดงผลการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากกระบวนการขนส่งทั้งหมด ดังตารางที่ 5.14 ดังนั้นผลลัพธ์ของการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโครงการตัวอย่างทั้ง 6 โครงการจะเป็นไปตามตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.14 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่งทั้งหมด

(โรงงานผลิตปูนซีเมนต์→โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ→โครงการก่อสร้าง) และ (โรงงานผลิตปูนซีเมนต์→โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป→โครงการก่อสร้าง)

โครงการ ตัวอย่าง	ระบบการก่อสร้าง	
	Total $E_{transport}$ หล่อในที่ (kgCO ₂ e)	Total $E_{transport}$ หล่อสำเร็จ (kgCO ₂ e)
1 (ผสม)	102.29	241.74
2	346.68	563.12
3	424.93	580.98
4	806.63	831.59
5	590.18	895.24
6	368.98	626.11

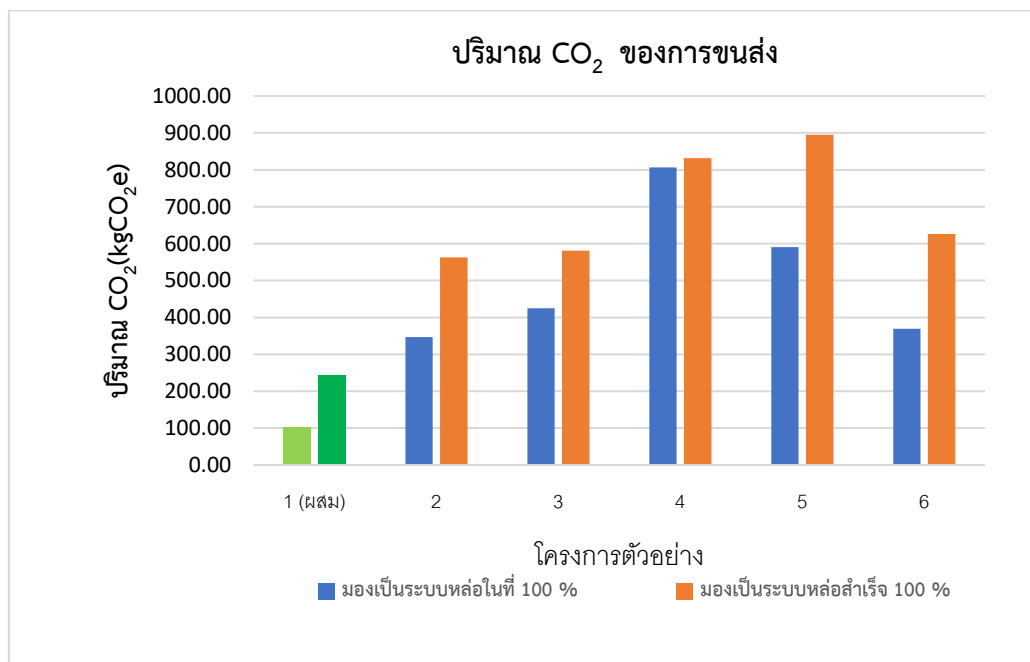
ตารางที่ 5.15 ผลรวมปริมาณ CO_2 ที่สะสม (Embodied CO_2) และ $E_{transport}$ ทั้งหมดในโครงการ
ตัวอย่าง

โครงการ ตัวอย่าง	ระบบการก่อสร้าง	
	Total Embodied CO_2 หล่อในที่ (kg CO_2 e)	Total Embodied CO_2 หล่อสำเร็จ (kg CO_2 e)
1 (ผสม)	803,147.84	803,287.29
2	803,392.23	803,608.67
3	803,470.48	803,626.53
4	803,852.17	803,877.13
5	803,635.73	803,940.79
6	803,414.52	803,671.65



5.4 สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณ CO₂ จากการขนส่ง ($E_{transport}$) ของโครงการตัวอย่าง

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ปริมาณ CO₂ จากการขนส่ง หรือ $E_{transport}$ ในโครงการตัวอย่าง สรุปเปรียบเทียบได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ปริมาณ CO₂ ของกิจกรรมการขนส่งในระบบการก่อสร้างทั้ง 2 แบบ

จากรูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณ CO₂ จากการขนส่งหรือ $E_{transport}$ ในโครงการตัวอย่าง ผู้วิจัยได้แบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 มุมมอง คือ มุมมองแรกเป็นแบบโครงการตัวอย่างเป็นระบบหล่อในที่ 100% และ มุมมองที่สอง เป็นแบบโครงการตัวอย่างเป็นระบบหล่อสำเร็จ 100%

โดยผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบในรูปที่ 5.2 พบว่า โครงการที่ 2, 3, 5 และ 6 นั้น ระบบหล่อสำเร็จมี ปริมาณ CO₂ มากกว่าระบบหล่อในที่ เพราะด้วยปัจจัยด้านระยะทางในการขนส่งนั้นมีมากกว่าโครงการอื่น ส่วนโครงการตัวอย่างที่ 4 พบว่าปริมาณ CO₂ กรณีเป็นระบบหล่อในที่นั้น มีค่าใกล้เคียงกับกรณีเป็นระบบหล่อสำเร็จ อย่างไรก็ตาม ถ้ามององค์ประกอบโดยรวมแล้วถือว่า ทั้ง 6 โครงการตัวอย่าง นั้นมี Embodied CO₂ ที่ใกล้เคียงกัน ดังผลรวมปริมาณ CO₂ ที่สะสม (Embodied CO₂) และ $E_{transport}$ ทั้งหมดในโครงการตัวอย่างที่ได้แสดงในตารางที่ T-35 ที่ผู้วิจัยได้ประเมินไว้ ทั้งนี้ เนื่องมาจาก การคำนวณส่วน Embodied CO₂ (ในขั้นตอนการผลิต) มีการใช้วัตถุดิบที่เป็นคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันที่เคยได้กล่าวไปในข้างต้น ดังนั้นการวัดปริมาณก๊าซ CO₂ จากการขนส่งหรือ $E_{transport}$ จะเป็นตัวชี้วัดถึงความเป็นมิตรของสิ่งแวดล้อม

บทที่ 6

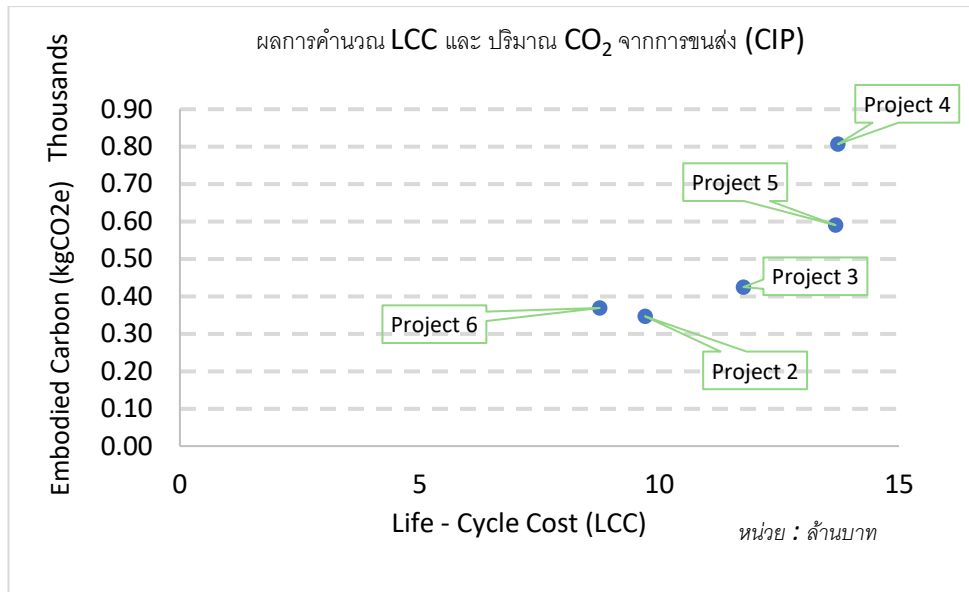
สรุปและอภิปรายผลงานวิจัย

จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จโดยวิธีมอนติคาร์โลและวิธีสัมประสิทธิ์ ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และปัญหาและอุปสรรคและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยในอนาคต รายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้

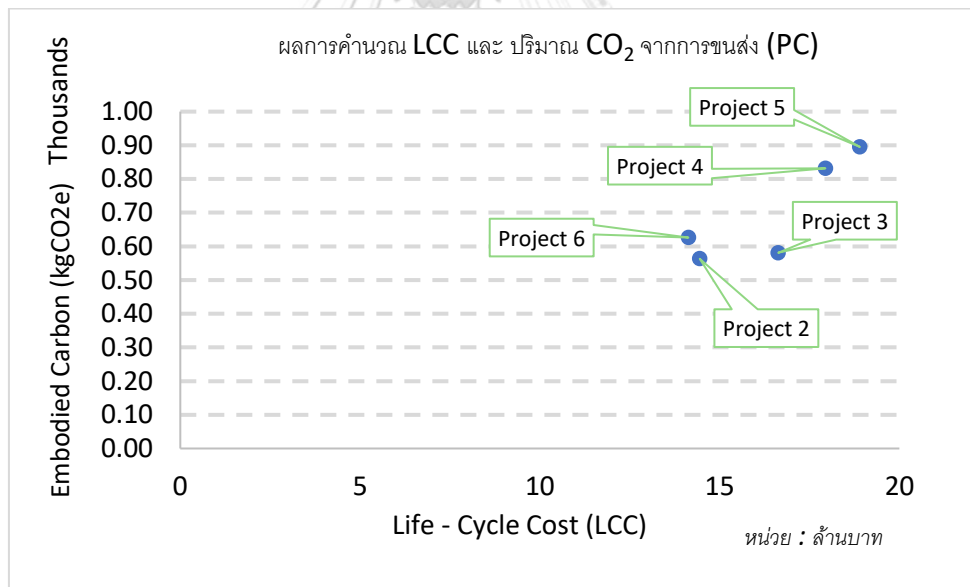
6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการเก็บรวบรวมข้อมูล และการวิเคราะห์หาต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ ในบทที่ 4 และการวิเคราะห์หาปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จบทที่ 5 ทำให้ทราบถึงค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (LCC) ที่เป็นไปได้ของแต่ละโครงการตัวอย่าง (ไม่นับโครงการตัวอย่างที่ 1 ที่เป็นระบบแบบผสม เนื่องจากในช่วงการเก็บข้อมูล โครงการยังไม่สามารถเก็บข้อมูลในส่วนของ O&M ได้เพียงพอ) และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Embodied Carbon) ที่มาจากวัสดุก่อสร้างคอนกรีต (ซีเมนต์) และการขนส่ง โดยมีขอบเขตเส้นทางการขนส่งในการคำนวณจะมีแค่ระยะทางของโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จไปยังโครงการตัวอย่าง (กรณีระบบหล่อในที่) และระยะทางของโรงงานคอนกรีตสำเร็จรูปไปยังโครงการตัวอย่าง (กรณีระบบหล่อสำเร็จ)

จากการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จ สรุปการเปรียบเทียบได้ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ รูปที่ 6.2 ตามลำดับ

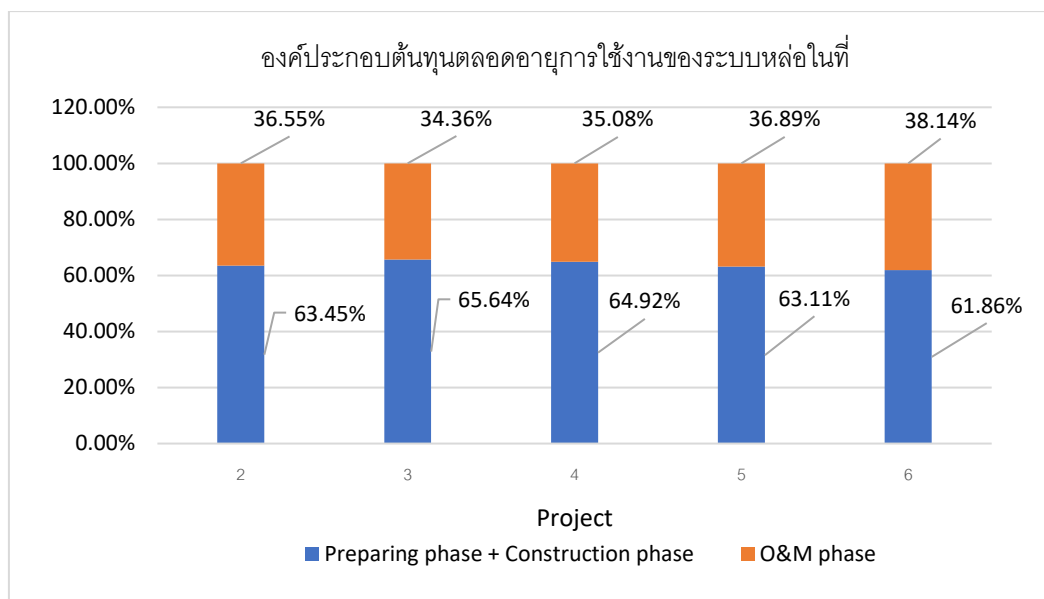


รูปที่ 6.1 ผลการคำนวณ LCC และ $E_{transport}$ ของระบบท่อในที่



รูปที่ 6.2 ผลการคำนวณ LCC และ $E_{transport}$ ของระบบท่อสำเร็จ

ในส่วนของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน หรือ Life - cycle cost นั้นพบว่า อัตราส่วนระหว่าง (1) ต้นทุนในช่วงเตรียมการและช่วงก่อสร้าง และ (2) ต้นทุนรวมในช่วงการใช้งาน แสดงสรุปผลการศึกษาดังในรูปที่ 6.3 และ 6.4

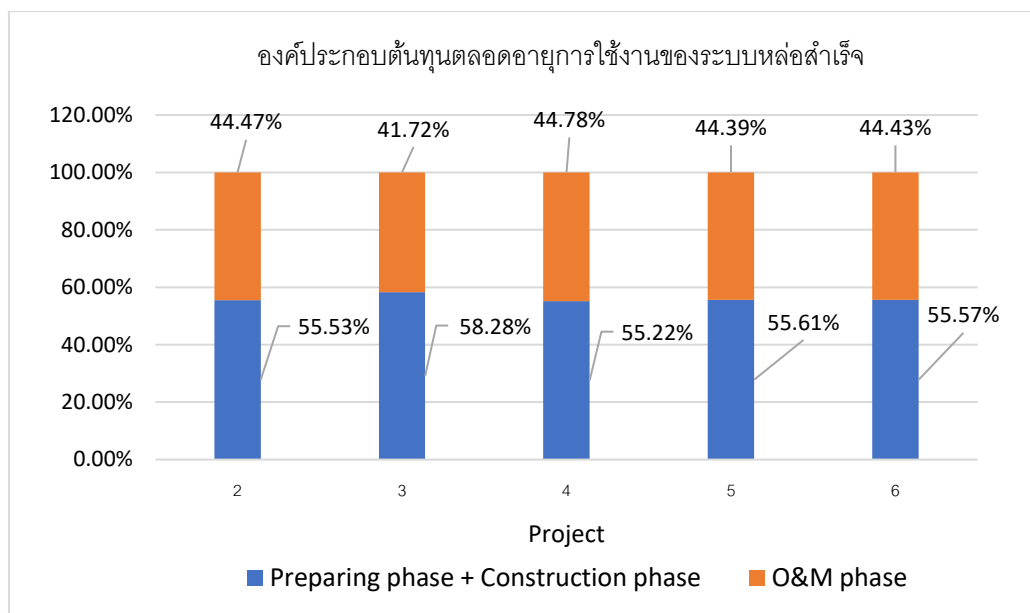


รูปที่ 6.3 องค์ประกอบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่ (50 ปี)

จากรูปที่ 6.3 พบว่า

- โครงการตัวอย่างที่ 2 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 63.45% และ O&M phase อยู่ที่ 36.55%
- โครงการตัวอย่างที่ 3 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 65.64% และ O&M phase อยู่ที่ 34.36%
- โครงการตัวอย่างที่ 4 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 64.92% และ O&M phase อยู่ที่ 35.08%
- โครงการตัวอย่างที่ 5 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 63.11% และ O&M phase อยู่ที่ 36.89%
- โครงการตัวอย่างที่ 6 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 61.86% และ O&M phase อยู่ที่ 38.14%

ในส่วนขององค์ประกอบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จ แสดงสรุปผลการศึกษาดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 องค์ประกอบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จ (50 ปี)

จากรูปที่ 6.4 พบว่า

- โครงการตัวอย่างที่ 2 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 55.53% และ O&M phase อยู่ที่ 44.47%
- โครงการตัวอย่างที่ 3 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 58.28% และ O&M phase อยู่ที่ 41.72%
- โครงการตัวอย่างที่ 4 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 55.22% และ O&M phase อยู่ที่ 44.78%
- โครงการตัวอย่างที่ 5 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 55.61% และ O&M phase อยู่ที่ 44.39%
- โครงการตัวอย่างที่ 6 มีอัตราส่วน Preparing phase กับ Construction phase อยู่ที่ 55.57% และ O&M phase อยู่ที่ 44.43%

จากอัตราส่วนขององค์ประกอบตามช่วงของต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน ดังรูป 6.3 และ 6.4 นั้นพบว่า ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่และหล่อสำเรีจนั้น พบว่าต้นทุนรวมใน 2 ช่วงแรกมีค่ามากกว่าต้นทุนรวมในช่วงการใช้งาน (O&M phase) โดยในส่วนของระบบการก่อสร้าง

แบบหล่อสำเร็จนั้น มีต้นทุนใน 2 ช่วงแรก และ ช่วงหลังการใช้งาน (O&M phase) มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน

ดังนั้น การพิจารณาดำเนินค่าใช้จ่ายตลอดอายุการพัฒนาและใช้งานของโครงการ มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ที่ผู้พัฒนาโครงการและลูกค้า (ผู้ใช้งาน) ควรพิจารณาเปรียบเทียบถึง ค่าต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานของโครงการ ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อตัดสินใจของเจ้าของโครงการ และลูกค้า ผู้ซึ่งจะเป็นผู้แบกรับต้นทุนในช่วงการใช้งานในอนาคต โดยจากโครงการตัวอย่างตั้งแต่โครงการที่ 2 ถึง 6 (โดยพิจารณาให้ระบบการก่อสร้างทั้ง 2 ระบบ นั้น ใช้ระยะเวลาเท่ากัน คือ 1 ปี) ในมุมมองของระบบหล่อในที่นั้นพบว่า ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อในที่นั้นน้อยกว่าระบบหล่อสำเร็จ และยังพบว่าอัตราส่วนของต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้ของระบบหล่อในที่ต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จนั้น อยู่ที่ 0.60 – 0.73 (โดยไม่คำนึงถึงมิติด้านเวลาที่แตกต่างกันในช่วงการก่อสร้าง)

สำหรับการวัดปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนโดยใช้วิธีสัมประสิทธิ์นั้นมีข้อสรุปว่าโครงการที่ 2, 3, 5 และ 6 นั้น พบว่าระบบหล่อสำเร็จมีปริมาณ CO₂ มากกว่าระบบหล่อในที่ เพราะด้วยปัจจัยของระยะทางในการขนส่งที่มากกว่า ส่วนโครงการที่ 4 นั้นพบว่า ปริมาณ CO₂ นั้นใกล้เคียงกับระบบหล่อสำเร็จ ทั้งนี้เพราะว่าจำนวนรอบในการขนส่งของโครงการตัวอย่างนี้นั้นมีจำนวนรอบในการขนส่งที่มาก แต่ถ้ามององค์ประกอบโดยรวมแล้วถือว่า ทั้ง 6 โครงการตัวอย่าง นั้นมี Embodied CO₂ ที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจาก การคำนวณ Embodied CO₂ (ในขั้นตอนการผลิต) มีการใช้วัตถุดิบที่เป็นคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันที่เคยได้กล่าวไปในข้างต้น ดังนั้นการวัดปริมาณก๊าซ CO₂ จากการขนส่งหรือ $E_{transport}$ จึงถือเป็นหนึ่งตัวชี้วัดถึงความเป็นมิตรของสิ่งแวดล้อมของทั้ง 2 ระบบการก่อสร้างในด้านการปล่อยปริมาณก๊าซ CO₂ (ยังมีตัวชี้วัดอื่น ๆ ที่อาจนำมาประกอบการพิจารณา ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่ได้นำมาประกอบการศึกษา) ซึ่งในการศึกษานี้ พบว่า ในมุมมองของเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ระบบหล่อในที่นั้นมีมุมมองที่เป็นบวกมากกว่าระบบหล่อสำเร็จ

6.2 อภิปรายผลวิจัย

จากการวิจัยการศึกษาเชิงเปรียบเทียบต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนของระบบหล่อในที่และระบบหล่อสำเร็จโดยวิธีมอนติคาร์โลและวิธีสัมประสิทธิ์ ผู้วิจัยพบว่า มีตัวแปรเสี่ยง 3 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานมากที่สุดไม่ว่าจะมองในมุมมองของระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่และแบบหล่อสำเร็จตัวแปรเสี่ยง 3 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานมากที่สุด ได้แก่

- Major repair cost (O&M phase)

- Construction cost (Construction phase)
- Preventive maintenance cost (O&M phase)

ซึ่งหลังจากผู้วิจัยได้นำ 3 ตัวแปรเสี่ยงนี้ไปทำการจำลองมอนติคาร์โลเพื่อหาค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้นั้น พบว่าอัตราส่วนของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้ของระบบหล่อในที่ต่อต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของระบบหล่อสำเร็จนั้น อยู่ที่ 0.60 – 0.73 ซึ่งจากเอกสารและงานวิจัยที่ได้เคยกล่าวไว้ว่า การเลือกใช้ระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จนั้น จะช่วยทำให้ต้นทุนรวมของโครงการก่อสร้างลดลง โดยลดลงเฉลี่ยประมาณอยู่ที่ 15% ซึ่งเอกสารของศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2020) ระบุว่า ระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จมีต้นทุนก่อสร้างรวมลดลง เนื่องจากการลดของต้นทุนแรงงานประมาณ 50% ของต้นทุนค่าแรงรวมทั้งหมด และระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จยังช่วยลดระยะเวลาก่อสร้างประมาณ 30% ของระยะเวลาเดิมที่ใช้กรณีเป็นระบบหล่อในที่ ทำให้การก่อสร้างเสร็จเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับระบบหล่อในที่ (Cast-in place) หรือระบบก่อสร้างเดิม (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2020) ซึ่งช่วยให้เจ้าของโครงการส่งมอบโครงการให้ลูกค้าได้เร็ว ได้รับกระแสเงินจากการปิดการขายได้เร็วขึ้น (Early cash flow from sales)

ผลที่ได้จากการศึกษานี้ สำหรับในส่วนของต้นทุนรวมในช่วง Construction phase ของระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่ ในโครงการตัวอย่างทั้ง 6 นั้นมากกว่าต้นทุนรวมในช่วง Construction phase ของระบบหล่อสำเร็จซึ่งต่างจากเอกสารของศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2020) ทั้งนี้เนื่องมาจาก ในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบของระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่และหล่อสำเร็จ ของการศึกษานี้ไม่ได้คำนึงถึงมิติเวลาที่แตกต่างกันของการก่อสร้างทั้ง 2 ระบบ โดยงานวิจัยกำหนดให้ระยะเวลาเท่ากันในการก่อสร้างทั้งสองระบบการก่อสร้าง เนื่องจากการเปรียบเทียบแบบปรับเปลี่ยนโครงการตัวอย่างที่ศึกษา ให้เป็นระบบหล่อในที่ (Cast-in place) และระบบหล่อสำเร็จ (Precast) เพื่อให้เป็นการเปรียบเทียบแบบโครงการเดียวกันแต่ใช้ระบบการก่อสร้างที่ต่างกัน

อย่างไรก็ตาม หากนำไปปัจจัยด้านเวลาที่แตกต่างกันของระบบการก่อสร้างทั้ง 2 มาประกอบการพิจารณา และใช้ข้อมูลของศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2020) ที่ระบุว่า ระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จช่วยลดระยะเวลาก่อสร้างประมาณ 30% ของระยะเวลาเดิมที่ใช้กรณีเป็นระบบหล่อในที่ และประเมินเบื้องต้นถึงต้นทุนค่าแรงที่อาจลดลงได้ เช่นในกรณีที่ก่อสร้างในระบบเดิมใช้เวลา 1 ปี หากโครงการใช้ระบบหล่อสำเร็จจะใช้ระยะเวลาประมาณ 8 เดือนครึ่ง ซึ่งหากใช้โครงการตัวอย่างที่ 2 ซึ่งมีต้นทุนในช่วงการก่อสร้างประมาณ 6,121,144 บาท และ 7,987,336 บาท สำหรับระบบหล่อในที่ และ สำหรับระบบหล่อสำเร็จ ตามลำดับ ระยะเวลาที่ลดได้จากการใช้ระบบหล่อสำเร็จ 1.5 เดือนของโครงการ จะช่วยลดต้นทุนค่าแรงได้ประมาณ 425,360 บาท และค่าดำเนินการประมาณ

552,970 บาท รวมประมาณ 978,330 บาท โดยใช้เกณฑ์ค่าแรงที่ประมาณ 30% ของค่าวัสดุ และค่าดำเนินการประมาณ 30% ของต้นทุนทางตรงรวม (Direct cost) (Factor = 1.3) ตามเกณฑ์ของกรมบัญชีกลาง รายละเอียดการประมาณการเป็นดังต่อไปนี้

$$\text{ต้นทุนทางตรง} = 7,987,336 / 1.3 = 6,144,104 \text{ บาท}$$

$$\text{ต้นทุนวัสดุ (Material cost)} = 6,144,104 / 1.3 = 4,726,234 \text{ บาท}$$

$$\text{ต้นทุนค่าแรง (Labor cost)} = 4,726,234 * 0.3 = 1,417,870 \text{ บาท}$$

$$\text{ค่าดำเนินการ (Overhead cost)} = 7,987,336 - 6,144,104 = 1,843,232 \text{ บาท}$$

$$\text{ประมาณการต้นทุนที่ลดลงได้} = 0.3 * (1,417,870 + 1,843,232) = 978,330 \text{ บาท}$$

จากการประมาณการต้นทุนที่ลดลงได้ = 978,330 บาท ต้นทุนในช่วงการก่อสร้างสำหรับระบบหล่อสำเร็จ จะปรับลดเหลือ 7,987,336 - 978,330 = 7,009,006 บาท หรือลดลงได้ประมาณ 12% เทียบกับ 15% ตามเอกสารของศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2020) ส่วนค่าแรง ลดลงประมาณ 425,360 บาท จากต้นทุนค่าแรงรวม 1,417,870 บาท หรือประมาณ 30% เทียบกับประมาณ 50% ตามการประเมินของศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2020)

สำหรับในส่วนของการหา Embodied CO₂ โดยถ้ามององค์ประกอบโดยรวมแล้วถือว่า ทั้ง 6 โครงการตัวอย่าง นั้นมี Embodied CO₂ ที่ใกล้เคียงกันดังที่ผู้จัดการโครงการ ทั้ง 6 โครงการได้คาดคะเนไว้ ทั้งนี้เนื่องมาจาก การคำนวณส่วน Embodied CO₂ (ในขั้นตอนการผลิต) มีการใช้วัตถุดิบที่เป็นคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันที่เคยได้กล่าวไปในข้างต้น เพราะในงานการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้วิธีสัมประสิทธิ์ หรือกล่าวคือคูณด้วย factor ของคอนกรีตจึงทำให้มี Embodied CO₂ ที่ใกล้เคียงกัน และในส่วนของการคำนวณของ $E_{transport}$ ผู้วิจัยได้คำนวณการขนส่งในโครงการตัวอย่างนั้นใช้รถจำนวน 1 คันเดียวในการขนส่งจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ไปยังโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (หล่อในที่) หรือ โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป (หล่อสำเร็จ) และ อีก 1 คันในการขนส่งจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ (หล่อในที่) หรือ โรงงานคอนกรีตสำเร็จรูป (หล่อสำเร็จ) ขนส่งไปยังโครงการตัวอย่างเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปริมาณ Embodied CO₂ รวมของระบบหล่อสำเร็จจะมีมากกว่าระบบหล่อในที่ไม่มากนัก แต่ถ้าเปรียบเทียบเฉพาะปริมาณ Embodied CO₂ จากกิจกรรมการขนส่ง (ดูค่าในตารางที่ 5.14 ประกอบ) จะเห็นว่า ระบบหล่อสำเร็จนั้นมีปริมาณค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมนี้ มากกว่าระบบหล่อในที่ ถึงร้อยละ 60 ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการขนส่งของทั้ง 2 ระบบ

โครงการ ตัวอย่าง	ระบบการก่อสร้าง		ผลต่าง (kgCO ₂ e)	ร้อยละของ ผลต่าง
	Total $E_{transport}$ หล่อในที่ (kgCO ₂ e)	Total $E_{transport}$ หล่อ สำเร็จ (kgCO ₂ e)		
1 (ผสม)	102.29	241.74	139.45	136%
2	346.68	563.12	216.44	62%
3	424.93	580.98	156.05	37%
4	806.63	831.59	24.96	3%
5	590.18	895.24	305.06	52%
6	368.98	626.11	257.13	70%
ร้อยละของผลต่างเฉลี่ย				60%

ดังนั้น หากประเมินผลกระทบทั้งภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีมูลค่า ในปี พ.ศ. 2564 (ค.ศ. 2021) ประมาณ 1,364.8 พันล้านบาท ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 1 จะเห็นว่า ในมิติของการเพิ่มขึ้นของระยะทางในการขนส่งที่แตกต่างกันของทั้ง 2 ระบบนั้น มีผลต่อค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ในการศึกษานี้มาจาก 6 โครงการตัวอย่างเท่านั้น ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการศึกษานี้ อาจต้องเพิ่มจำนวนโครงการศึกษาให้ครอบคลุมและมากขึ้น ซึ่งต้องใช้เวลาและงบประมาณที่เพิ่มขึ้นตามมา

6.3 ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยในอนาคต

การวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าที่เป็นไปได้ของต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่และแบบหล่อสำเร็จ โดยได้สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อการประเมินเปรียบเทียบ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ค่อนข้างเข้าถึงได้อย่างจำกัด ทำให้ผลการประเมินวิเคราะห์ที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลบางตัวแปรที่อาจใช้การประเมินจากความเห็นหรือการประมาณการของผู้ให้ข้อมูล เช่น ผู้จัดการโครงการ เป็นต้น ซึ่งทางผู้วิจัยคิดว่าถ้ามีข้อมูลของโครงการตัวอย่างอื่นๆเพิ่ม ผู้วิจัยจะสามารถประมาณหาค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่เป็นไปได้จาก Envelope method ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากขึ้น เพราะค่าสมการ 3 สมการที่ได้จากการ Regression จะเป็น Envelope Area ที่ใกล้เคียงกับความ เป็นจริงมากขึ้น และเนื่องจากการขอข้อมูลจากการถามความเห็นของผู้จัดการโครงการซึ่งมีข้อมูล

บางตัวแปรที่อาจใช้การประเมินจากความเห็นหรือการประมาณการของผู้ให้ข้อมูล ทำให้ตัวแปรบางตัวแปรนั้นอาจยังคงเป็นคำถามว่าแม่นยำเพียงพอหรือไม่ สำหรับในส่วนของกรณีการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยวิธีสัมประสิทธิ์ อุปสรรคหรือข้อจำกัดของการวิจัยครั้งนี้คือ ผู้วิจัยไม่ได้ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการประเมินปริมาณก๊าซ CO₂ (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ที่มาจากเครื่องจักร (หน้า 76) เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาที่ผู้วิจัยไม่สามารถทำการจับเวลาในการทำงานของเครื่องจักรทุกชนิดในโครงการตัวอย่างทั้ง 6 โครงการได้อย่างครบถ้วน และจากเหตุผลที่ผู้วิจัยไม่ได้อยู่ในสถานที่ก่อสร้างของโครงการตัวอย่างทั้ง 6 โครงการได้ตลอดเวลา ดังนั้นตัวแปรการประมาณการต้นทุนตลอดการใช้งานและปริมาณก๊าซ CO₂ (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ที่มาจากเครื่องจักรยังเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาในอนาคต เพื่อให้ได้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น สำหรับการประเมินมูลค่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งานและการประมาณปริมาณการปล่อยสารคาร์บอนในระบบการก่อสร้างทั้งสองแบบ



ภาคผนวก

1. โค้ดโปรแกรม MATLAB R2022b ของระบบหล่อในที่

```
m = 10000;
```

```
a = ones(10000,1);
```

```
tmin = 4;
```

```
tpeak = 7;
```

```
tmax = 10;
```

```
pd = makedist('Triangular','a',tmin,'b',tpeak,'c',tmax);
```

```
designCost = a.*35000;
```

```
constructionCostPV = 4382932.89;
```

```
constructionphraseCostPV = a.*6121144.62 ;
```

```
majorrepairCost = a.*(692640*3);
```

```
t = random(pd,m,1);
```

```
t = round(t);
```

```
hist(t,30);
```

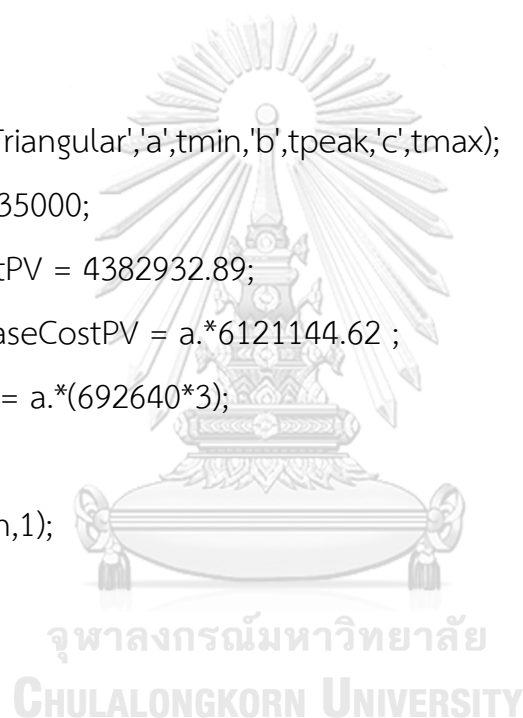
```
for i=1:m
```

```
    bound(i,1) = (-0.0003)*t(i,1)^3+(0.0066)*t(i,1)^2+(-  
0.0351)*t(i,1)+0.0935;%upper
```

```
    bound(i,2) = (-0.00007)*t(i,1)^3+(0.0024)*t(i,1)^2+(-  
0.0146)*t(i,1)+0.0574;%prob
```

```
    bound(i,3) = (-0.0001)*t(i,1)^3+(0.0022)*t(i,1)^2+(-  
0.0106)*t(i,1)+0.0406;%lower
```

```
    pd2 = makedist('Triangular','a',bound(i,3),'b',bound(i,2),'c',bound(i,1));
```




```

    percentcc(i) = random(pd2, 1, 1); % Store the result for this iteration
end
hist(percentcc,30);
for i=1:m
    OMbound(i,1) = bound(i,1).*constructionCostPV;
    OMbound(i,2) = bound(i,2).*constructionCostPV;
    OMbound(i,3) = bound(i,3).*constructionCostPV;
end

Thouse = 50;

upperOMCost = zeros(m,Thouse);
probOMCost = zeros(m,Thouse);
lowerOMCost = zeros(m,Thouse);
for i=1:m
    j = t(i,1);
    while j < Thouse+1
        upperOMCost(i,j) = OMbound(i,1);
        probOMCost(i,j) = OMbound(i,2);
        lowerOMCost(i,j) = OMbound(i,3);
        j = j+t(i,1);
    end
end

r = 0.02;
for i = 1:m
    for j=1:Thouse

```

```

        discountVector1(i,j) = ((1+r)^j); %แปลงเป็น future value
    end
end

upperFV = upperOMCost.*discountVector1;
probFV = probOMCost.*discountVector1;
lowerFV = lowerOMCost.*discountVector1;

for i = 1:m
    for j=1:Thouse
        discountVector2(i,j) = (1/(1+r)^j); %แปลงเป็น present value
    end
end

upperPV = upperFV.*discountVector2;
probPV = probFV.*discountVector2;
lowerPV = lowerFV.*discountVector2;

upperSum = sum(upperPV,2);
probSum = sum(probPV,2);
lowerSum = sum(lowerPV,2);

Constant = designCost+constructionphraseCostPV+majorrepairCost;

for i = 1:m
    pd3 =
    makedist('Triangular','a',lowerSum(i,1),'b',probSum(i,1),'c',upperSum(i,1));

```

```

end
OMLCC = random(pd3,m,1);
% histogram(OMLCC,'FaceColor', [0.80 0.80 0.80]);
% hold on
% xlabel('OM Cost(Baht)','FontSize',24)
% ylabel('Frequency','FontSize',24)
% title('Project 2 CIP','FontSize',26)
% ax = gca; % Get the current axes handle
% ax.XAxis.FontSize = 20; % Change 20 to your desired x-axis font size
% ax.YAxis.FontSize = 20; % Change 20 to your desired y-axis font size
% hold off

Lifecylecost = (ones(10000,1).*Constant)+OMLCC;
Meanlcc = mean(Lifecylecost);
stdlcc = std(Lifecylecost);
histogram(Lifecylecost,'FaceColor', [0.80 0.80 0.80]);
hold on
xlabel('LCC (Baht)','FontSize',24)
ylabel('Frequency','FontSize',24)
title('Project 2 CIP','FontSize',26)
annotation('textbox', [0.7, 0.7, 0.2, 0.1], 'String','Number simulation =
10000','FontSize',18, 'FitBoxToText', 'on');
annotation('textbox', [0.7, 0.65, 0.2, 0.1], 'String',['mean = ',
num2str(Meanlcc)],'FontSize',18, 'FitBoxToText', 'on');
annotation('textbox', [0.7, 0.6, 0.2, 0.1], 'String', ['sd = ', num2str(stdlcc)],
'FontSize', 18, 'FitBoxToText', 'on');
ax = gca; % Get the current axes handle

```

```
ax.XAxis.FontSize = 20; % Change 20 to your desired x-axis font size
ax.YAxis.FontSize = 20; % Change 20 to your desired y-axis font size
hold off
```

```
% y1 = (-0.0003)*(t).^3+(0.0066)*(t).^2+(-0.0351)*t+0.0935;
% y2 = (-0.00007)*(t).^3+(0.0024)*(t).^2+(-0.0146)*t+0.0574;
% y3 = (-0.0001)*(t).^3+(0.0022)*(t).^2+(-0.0106)*(t)+0.040;
% T = t;
% C = percentcc;
% scatter(T,C)
% hold on
% plot(T,y1,"x","Color","Yellow")
% plot(T,y2,"x","Color","green")
% plot(T,y3,"x","Color","red")
% hold off
```

2. โค้ดโปรแกรม MATLAB R2022b ของระบบหล่อสำเร็จ

```
m = 10000;
```



```
a = ones(10000,1);
```

```
tmin = 5;
```

```
tpeak = 6;
```

```
tmax = 8;
```

```
pd = makedist('Triangular','a',tmin,'b',tpeak,'c',tmax);
```

```
designCost = a.*35000;
```

```
constructionCostPV = 6145447.12;
```

```

constructionphraseCostPV = a.* 7987336.17;
majorrepairCost = a.*(1539200*3);
t = random(pd,m,1);
t= round(t);
hist(t,7);
for i=1:m
    bound(i,1) = (0.0003)*t(i,1)^2+(0.0058)*t(i,1)-0.0059;%upper
    bound(i,2) = (0.0106)*t(i,1)-0.0261;%prob
    bound(i,3) = (0.0088)*t(i,1)-0.0192;%lower
    pd2 = makedist('Triangular','a',bound(i,3),'b',bound(i,2),'c',bound(i,1));
    percentcc(i) = random(pd2, 1, 1); % Store the result for this iteration
end
hist(percentcc,30);
for i=1:m
    OMbound(i,1) = bound(i,1).*constructionCostPV;
    OMbound(i,2) = bound(i,2).*constructionCostPV;
    OMbound(i,3) = bound(i,3).*constructionCostPV;
end
Thouse = 50;

upperOMCost = zeros(m,Thouse);
probOMCost = zeros(m,Thouse);
lowerOMCost = zeros(m,Thouse);
for i=1:m
    j = t(i,1);
    while j < Thouse+1

```

```

    upperOMCost(i,j) = OMbound(i,1);
    probOMCost(i,j) = OMbound(i,2);
    lowerOMCost(i,j) = OMbound(i,3);
    j = j+t(i,1);
end
end
r = 0.02;
for i = 1:m
    for j=1:Thouse
        discountVector1(i,j) = ((1+r)^j); %แปลงเป็น future value
    end
end

upperFV = upperOMCost.*discountVector1;
probFV = probOMCost.*discountVector1;
lowerFV = lowerOMCost.*discountVector1;

for i = 1:m
    for j=1:Thouse
        discountVector2(i,j) = (1/(1+r)^j); %แปลงเป็น present value
    end
end

upperPV = upperFV.*discountVector2;
probPV = probFV.*discountVector2;
lowerPV = lowerFV.*discountVector2;

```

```

upperSum = sum(upperPV,2);
probSum = sum(probPV,2);
lowerSum = sum(lowerPV,2);

Constant = designCost+constructionphraseCostPV+majorrepairCost;

for i = 1:m
    pd3 =
    makedist('Triangular','a',lowerSum(i,1),'b',probSum(i,1),'c',upperSum(i,1));
end
OMLCC = random(pd3,m,1);
% histogram(OMLCC,'FaceColor', [0.80 0.80 0.80]);
% hold on
% xlabel('OM Cost(Baht)','FontSize',24)
% ylabel('Frequency','FontSize',24)
% title('Project 2 PC','FontSize',26)
% ax = gca; % Get the current axes handle
% ax.XAxis.FontSize = 20; % Change 20 to your desired x-axis font size
% ax.YAxis.FontSize = 20; % Change 20 to your desired y-axis font size
% hold off
Lifecyclecost = (ones(10000,1).*Constant)+OMLCC;
Meanlcc = mean(Lifecyclecost);
stdlcc = std(Lifecyclecost);
histogram(Lifecyclecost,'FaceColor', [0.80 0.80 0.80]);
hold on
xlabel('LCC (Baht)','FontSize',24)

```

```

ylabel('Frequency','FontSize',24)
title('Project 2 PC','FontSize',26)
annotation('textbox', [0.2, 0.7, 0.2, 0.1], 'String','Number simulation =
10000','FontSize',18, 'FitBoxToText', 'on');
annotation('textbox', [0.2, 0.65, 0.2, 0.1], 'String',['mean = ',
num2str(Meanlcc)],'FontSize',18, 'FitBoxToText', 'on');
annotation('textbox', [0.2, 0.6, 0.2, 0.1], 'String',['sd = ',
num2str(stdlcc)],'FontSize',18, 'FitBoxToText', 'on');
ax = gca; % Get the current axes handle
ax.XAxis.FontSize = 20; % Change 24 to your desired x-axis font size
ax.YAxis.FontSize = 20; % Change 24 to your desired y-axis font size
hold off
% % % y1 = (0.0003)*(t).^2+(0.0058)*(t)-0.0059;
% % % y2 = (0.0106)*(t)-0.0261;
% % % y3 = (0.0088)*(t)-0.0192;
% % %
% T = t;
% C = percentcc;
% scatter(T,C)
% hold on
% plot(T,y1,"x","Color","Yellow")
% plot(T,y2,"x","Color","green")
% plot(T,y3,"x","Color","red")
% hold off

```


3. ข้อมูลใน Microsoft Excel ของ โครงการตัวอย่าง

Project ที่	Type of system	Phase	ตัวแปรของโมเดล	Year	Cost (THB)
2	PC	Preparing phase	1.Design	0	35,000.00
2	PC	Construction phase	2.Prelim Cost	1	1,030,000.00
2	PC	Construction phase	3.Construction Cost	1	6,145,447.12
2	PC	Construction phase	4.Contingency Cost	1	491,635.77
2	PC	O&M phase	5.Admins	1	480,000.00
2	PC	O&M phase	6.Minor repair	6	254,440.13
2	PC	O&M phase	6.Minor repair	12	286,540.91
2	PC	O&M phase	6.Minor repair	18	322,691.61
2	PC	O&M phase	6.Minor repair	24	363,403.16
2	PC	O&M phase	6.Minor repair	30	409,250.99
2	PC	O&M phase	6.Minor repair	36	460,883.08
2	PC	O&M phase	6.Minor repair	42	519,029.21
2	PC	O&M phase	6.Minor repair	48	584,511.19
2	PC	O&M phase	7.Major repair	15	2,071,560.55
2	PC	O&M phase	7.Major repair	30	2,788,047.75
2	PC	O&M phase	7.Major repair	45	3,752,345.19
2	CIP	Preparing phase	1.Design	0	35,000.00
2	CIP	Construction phase	2.Prelim Cost	1	1,030,000.00
2	CIP	Construction phase	3.Construction Cost	1	4,382,932.89
2	CIP	Construction phase	4.Contingency Cost	1	350,634.63
2	CIP	O&M phase	5.Admins	1	480,000.00
2	CIP	O&M phase	6.Minor repair	7	240,871.64

2	CIP	O&M phase	6.Minor repair	14	276,685.80
2	CIP	O&M phase	6.Minor repair	21	317,825.02
2	CIP	O&M phase	6.Minor repair	28	365,081.04
2	CIP	O&M phase	6.Minor repair	35	419,363.36
2	CIP	O&M phase	6.Minor repair	42	481,716.68
2	CIP	O&M phase	6.Minor repair	49	553,341.05
2	CIP	O&M phase	7.Major repair	15	932,202.25
2	CIP	O&M phase	7.Major repair	30	1,254,621.49
2	CIP	O&M phase	7.Major repair	45	1,688,555.34
3	PC	Preparing phase	1.Design	0	20,000.00
3	PC	Construction phase	2.Prelim Cost	1.00	1,164,000.00
3	PC	Construction phase	3.Construction Cost	1.00	7,613,152.43
3	PC	Construction phase	4.Contingency Cost	1.00	609,052.19
3	PC	O&M phase	5.Admins	1.00	480,000.00
3	PC	O&M phase	6.Minor repair	6.00	315,207.58
3	PC	O&M phase	6.Minor repair	12.00	354,974.93
3	PC	O&M phase	6.Minor repair	18.00	399,759.43
3	PC	O&M phase	6.Minor repair	24.00	450,194.04
3	PC	O&M phase	6.Minor repair	30.00	506,991.61
3	PC	O&M phase	6.Minor repair	36.00	570,954.90
3	PC	O&M phase	6.Minor repair	42.00	642,987.95
3	PC	O&M phase	6.Minor repair	48.00	724,108.87
3	PC	O&M phase	7.Major repair	15.00	2,107,812.86
3	PC	O&M phase	7.Major repair	30.00	2,836,838.59
3	PC	O&M phase	7.Major repair	45.00	3,818,011.23
3	CIP	Preparing phase	1.Design	0	20,000.00
3	CIP	Construction phase	2.Prelim Cost	1.00	1,164,000.00
3	CIP	Construction phase	3.Construction	1.00	5,745,775.42

			Cost		
3	CIP	Construction phase	4.Contingency Cost	1.00	459,662.03
3	CIP	O&M phase	5.Admins	1.00	480,000.00
3	CIP	O&M phase	6.Minor repair	7.00	315,769.01
3	CIP	O&M phase	6.Minor repair	14.00	362,719.33
3	CIP	O&M phase	6.Minor repair	21.00	416,650.50
3	CIP	O&M phase	6.Minor repair	28.00	478,600.45
3	CIP	O&M phase	6.Minor repair	35.00	549,761.48
3	CIP	O&M phase	6.Minor repair	42.00	631,503.14
3	CIP	O&M phase	6.Minor repair	49.00	725,398.60
3	CIP	O&M phase	7.Major repair	15.00	948,515.79
3	CIP	O&M phase	7.Major repair	30.00	1,276,577.36
3	CIP	O&M phase	7.Major repair	45.00	1,718,105.06
4	PC	Preparing phase	1.Design	0	20,000.00
4	PC	Construction phase	2.Prelim Cost	1.00	1,687,000.00
4	PC	Construction phase	3.Construction Cost	1.00	7,220,879.90
4	PC	Construction phase	4.Contingency Cost	1.00	577,670.39
4	PC	O&M phase	5.Admins	1.00	600,000.00
4	PC	O&M phase	6.Minor repair	6.00	298,966.31
4	PC	O&M phase	6.Minor repair	12.00	336,684.62
4	PC	O&M phase	6.Minor repair	18.00	379,161.57
4	PC	O&M phase	6.Minor repair	24.00	426,997.51
4	PC	O&M phase	6.Minor repair	30.00	480,868.55
4	PC	O&M phase	6.Minor repair	36.00	541,536.09
4	PC	O&M phase	6.Minor repair	42.00	609,857.59
4	PC	O&M phase	6.Minor repair	48.00	686,798.70
4	PC	O&M phase	7.Major repair	15.00	2,651,597.50

4	PC	O&M phase	7.Major repair	30.00	3,568,701.12
4	PC	O&M phase	7.Major repair	45.00	4,803,001.85
4	CIP	Preparing phase	1.Design	0	20,000.00
4	CIP	Construction phase	2.Prelim Cost	1.00	1,687,000.00
4	CIP	Construction phase	3.Construction Cost	1.00	6,279,026.00
4	CIP	Construction phase	4.Contingency Cost	1.00	502,322.08
4	CIP	O&M phase	5.Admins	1.00	600,000.00
4	CIP	O&M phase	6.Minor repair	7.00	305,258.40
4	CIP	O&M phase	6.Minor repair	14.00	350,645.95
4	CIP	O&M phase	6.Minor repair	21.00	402,781.97
4	CIP	O&M phase	6.Minor repair	28.00	462,669.88
4	CIP	O&M phase	6.Minor repair	35.00	531,462.26
4	CIP	O&M phase	6.Minor repair	42.00	610,483.08
4	CIP	O&M phase	6.Minor repair	49.00	701,253.17
4	CIP	O&M phase	7.Major repair	15.00	1,325,798.75
4	CIP	O&M phase	7.Major repair	30.00	1,784,350.56
4	CIP	O&M phase	7.Major repair	45.00	2,401,500.92
5	PC	Preparing phase	1.Design	0	20,000.00
5	PC	Construction phase	2.Prelim Cost	1.00	1,737,610.00
5	PC	Construction phase	3.Construction Cost	1.00	7,687,574.70
5	PC	Construction phase	4.Contingency Cost	1.00	615,005.98
5	PC	O&M phase	5.Admins	1.00	660,000.00
5	PC	O&M phase	6.Minor repair	6.00	318,288.89
5	PC	O&M phase	6.Minor repair	12.00	358,444.98
5	PC	O&M phase	6.Minor repair	18.00	403,667.27
5	PC	O&M phase	6.Minor repair	24.00	454,594.91

5	PC	O&M phase	6.Minor repair	30.00	511,947.70
5	PC	O&M phase	6.Minor repair	36.00	576,536.26
5	PC	O&M phase	6.Minor repair	42.00	649,273.47
5	PC	O&M phase	6.Minor repair	48.00	731,187.38
5	PC	O&M phase	7.Major repair	15.00	2,749,996.63
5	PC	O&M phase	7.Major repair	30.00	3,701,133.39
5	PC	O&M phase	7.Major repair	45.00	4,981,238.24
5	CIP	Preparing phase	1.Design	0	20,000.00
5	CIP	Construction phase	2.Prelim Cost	1.00	1,737,610.00
5	CIP	Construction phase	3.Construction Cost	1.00	5,913,519.00
5	CIP	Construction phase	4.Contingency Cost	1.00	473,081.52
5	CIP	O&M phase	5.Admins	1.00	660,000.00
5	CIP	O&M phase	6.Minor repair	7.00	324,987.64
5	CIP	O&M phase	6.Minor repair	14.00	373,308.65
5	CIP	O&M phase	6.Minor repair	21.00	428,814.29
5	CIP	O&M phase	6.Minor repair	28.00	492,572.83
5	CIP	O&M phase	6.Minor repair	35.00	565,811.35
5	CIP	O&M phase	6.Minor repair	42.00	649,939.39
5	CIP	O&M phase	6.Minor repair	49.00	746,576.07
5	CIP	O&M phase	7.Major repair	15.00	1,374,998.31
5	CIP	O&M phase	7.Major repair	30.00	1,850,566.69
5	CIP	O&M phase	7.Major repair	45.00	2,490,619.12
6	PC	Preparing phase	1.Design	0	25,000.00
6	PC	Construction phase	2.Prelim Cost	1.00	931,419.45
6	PC	Construction phase	3.Construction Cost	1.00	5,650,680.00
6	PC	Construction phase	4.Contingency Cost	1.00	452,054.40

6	PC	O&M phase	5.Admins	1.00	500,000.00
6	PC	O&M phase	6.Minor repair	6.00	233,955.27
6	PC	O&M phase	6.Minor repair	12.00	263,471.64
6	PC	O&M phase	6.Minor repair	18.00	296,711.86
6	PC	O&M phase	6.Minor repair	24.00	334,145.74
6	PC	O&M phase	6.Minor repair	30.00	376,302.38
6	PC	O&M phase	6.Minor repair	36.00	423,777.60
6	PC	O&M phase	6.Minor repair	42.00	477,242.40
6	PC	O&M phase	6.Minor repair	48.00	537,452.46
6	PC	O&M phase	7.Major repair	15.00	2,071,560.55
6	PC	O&M phase	7.Major repair	30.00	2,788,047.75
6	PC	O&M phase	7.Major repair	45.00	3,752,345.19
6	CIP	Preparing phase	1.Design	0	25,000.00
6	CIP	Construction phase	2.Prelim Cost	1.00	931,419.45
6	CIP	Construction phase	3.Construction Cost	1.00	3,767,120.00
6	CIP	Construction phase	4.Contingency Cost	1.00	301,369.60
6	CIP	O&M phase	5.Admins	1.00	500,000.00
6	CIP	O&M phase	6.Minor repair	7.00	207,028.58
6	CIP	O&M phase	6.Minor repair	14.00	237,810.76
6	CIP	O&M phase	6.Minor repair	21.00	273,169.82
6	CIP	O&M phase	6.Minor repair	28.00	313,786.25
6	CIP	O&M phase	6.Minor repair	35.00	360,441.77
6	CIP	O&M phase	6.Minor repair	42.00	414,034.30
6	CIP	O&M phase	6.Minor repair	49.00	475,595.26
6	CIP	O&M phase	7.Major repair	15.00	932,202.25
6	CIP	O&M phase	7.Major repair	30.00	1,254,621.49
6	CIP	O&M phase	7.Major repair	45.00	1,688,555.34

บรรณานุกรม

- Attakrai Punpukdee. (2009). Sensitivity Analysis การวิเคราะห์ความอ่อนไหว. Retrieved from <https://www.gotoknow.org/posts/251763>
- CARBON CURE. (2020). What is Embodied Carbon? Retrieved from <https://www.carboncure.com/concrete-corner/what-is-embodied-carbon/>
- Grand View Research. (2020). Precast Concrete Market Size & Share Report. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/precast-concrete-market>
- 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.
- Kenton, W. (2022). Sensitivity Analysis Definition. Retrieved from <https://www.investopedia.com/terms/s/sensitivityanalysis.asp>
- Kokkaew, Rudjanakanoknad, & Jittichai. (2017). Green assessment of Thailand's highway infrastructure: A green growth index approach. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 2526-2537.
- Onizuka, T., & ONIZUKA, T. (2015). *Manufacturing engineering handbook*: McGraw-Hill Education.
- Paul Mobbs. (2021). The Limits to Growth. Retrieved from <https://www.resilience.org/stories/2021-09-02/the-limits-to-growth-1972/>
- Policy, E. (2015). Planning office (EPPO). *Electricity Consumption in MEA Area (Classified by Tariff)*. Available online: <https://bit.ly/2ThIH33> (accessed on 27 April 2020).
- Puttachard Lunkam. (2021). แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-2566: ธุรกิจวัสดุก่อสร้าง. Retrieved from <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/construction-construction-materials/construction-materials/io/io-construction-materials-21>
- Royal Institution of Chartered Surveyors. (2012). *Methodology to Calculate Embodied Carbon of Materials: RICS Information Paper*: Royal Institution of Chartered Surveyors.
- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125-130.
- Vasishta, T., Mehany, M. H., & Killingsworth, J. (2023). Comparative life cycle assessment

- (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA) of precast and cast-in-place buildings in United States. *Journal of Building Engineering*, 67, 105921.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2021). รายงานประจำปีกรมควบคุมมลพิษ. Retrieved from สำนักงานเลขาธิการ กรม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม:
<https://www.pcd.go.th/publication/25879>
- กองกฤษณ์ โตชัยวัฒน์. (2017). Precast Concrete Construction System and Value Appraisal of Residences in Housing Projects. Published in Thai Valuers Association Website.
- กาญจนาวิสุทธิ, ก. (2021). แนวโน้มอุตสาหกรรมการก่อสร้างไทย. Retrieved from
<https://thunhoon.com/article/244778>.
- ซีแพนเนล. (2021). แบบแสดงรายการข้อมูลประจำปี. Retrieved from <https://cpanel.co.th/investor-relations/annual-report/>
- นายสีบตระกูล สมบัติทิพย์. (2011). การบริหารจัดการของอาคารที่ก่อสร้างด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูป. (ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยบูรพา, มหาวิทยาลัยบูรพา. Retrieved from <http://202.28.34.124/dspace/bitstream/123456789/1435/1/61010363002.pdf>
- นิรุทธิ์ อมรคณารัตน์. (2019). การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดวัฏจักรวงจรชีวิตของการปรับปรุงอาคาร. (ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต. Retrieved from <https://libdoc.dpu.ac.th/thesis/NiruttAmo.pdf>
- บ้านและสวน. (2018). ทำไม Precast เมืองไทยถึงแยในสายตาผู้บริโภค คำตอบจากมุมมองของผู้บริหารโรงงานผู้ผลิต Precast ขนาดใหญ่. Retrieved from <https://www.baanlaesuan.com/79663/dontmiss/pros-2>
- เพียรโตทำโรง. (2016). การประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยวิธีการจำลองมอนติคาร์โล. Retrieved from https://training.nimt.or.th/wp-content/uploads/2016/04/monte_carlo_simulation.pdf
- เมธากุล มีธรรม. (2019). แบบจำลองสัญญาณแบบจูงใจให้ผู้รับเหมางานก่อสร้างถนนลดการปล่อยมลพิษทางอากาศ. (วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. Retrieved from <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/8360>
- ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. (2020). การก่อสร้างด้วย Pre-cast ตอบโจทย์ปัญหาปัจจุบันและอนาคต. Retrieved from <https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-econ/business/Pages/z3155-Precast-Construction.aspx>
- สมัชชาใหญ่แห่งสหประชาชาติ. (2022). Population Division. Retrieved from <https://www.un.org/development/desa/pd/>
- อัจฉรา โยมสินธุ์. (2012). 365+1 คำศัพท์ทางการเงินและการลงทุน. ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	รัชชานนท์ เอี่ยมรอด
วัน เดือน ปี เกิด	14 เมษายน 2541
วุฒิการศึกษา	คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ที่อยู่ปัจจุบัน	125/353 หมู่บ้านสายลม ซอย 10 ถ.แจ้งวัฒนะ ต.ปากเกร็ด อ. ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY