

การประยุกต์ใช้โปรแกรม Arena บนพื้นฐานทฤษฎีแถวคอยเพื่อปรับปรุงกระบวนการส่งมอบบ้านในโครงการบ้านจัดสรร

Arena-based queue simulation for improving delivery process management in housing development projects

ศุภเสกข์ เกตุรักษา* และ วุฒิชัย ชชาติพัฒนานันท์

Sooppasek Katruksa* and Vuttichai Chatpattananan

บทคัดย่อ

กระบวนการส่งมอบบ้านในโครงการบ้านจัดสรรมีลักษณะของระบบแถวคอย ซึ่งความล่าช้าในกระบวนการส่งผลโดยตรงต่อความพึงพอใจของลูกค้า งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการจัดการส่งมอบบ้านใน 4 โครงการบ้านจัดสรรในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยเก็บข้อมูลจริงจากบ้านจำนวน 74 หลัง ครอบคลุมระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม-ธันวาคม 2565 วัตถุประสงค์หลักคือระบุปัญหาและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในระบบ รวมถึงทดสอบแนวทางปรับปรุงด้วยการจำลองสถานการณ์บนพื้นฐานทฤษฎีแถวคอยจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าปัญหาสำคัญเกิดจากการกระจุกตัวของ การจองและโอนกรรมสิทธิ์ในช่วงปลายไตรมาส ประกอบกับจำนวนผู้รับเหมาที่ไม่เพียงพอและการกระจายงานที่ไม่สมดุล ส่งผลให้เวลารอคอยเฉลี่ยสูงถึง 8.64 วัน และเวลารวมในระบบเฉลี่ย 33.14 วันต่อหลัง งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Arena ในการจำลองสถานการณ์แบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง (discrete-event simulation) จำนวน 500 รอบการจำลองเพื่อทดสอบ 2 แนวทางปรับปรุง ได้แก่ รูปแบบที่ 1 การเพิ่มจำนวนผู้รับเหมาจาก 2 เป็น 3 ราย และรูปแบบที่ 2 การแบ่งกลุ่มลูกค้าและผู้รับเหมาตามลักษณะงาน ผลการจำลองพบว่ารูปแบบที่ 1 สามารถลดเวลารอคอยเหลือ 2.86 วัน และเวลารวมในระบบเหลือ 25.48 วัน ขณะที่รูปแบบที่ 2 ให้ผลดียิ่งกว่าโดยลดเวลาเก็บงานที่สร้างมูลค่าเหลือ 18.14 วัน และเวลารวมในระบบเหลือ 24.51 วัน พร้อมกระจายอัตราการใช้งานผู้รับเหมาอย่างสมดุล (9.94 และ 9.87 เปอร์เซ็นต์) โดยที่ต้นทุนรวมยังคงเท่าเดิมที่ 75,000 บาท ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการแบ่งประเภทลูกค้าและจับคู่กับผู้รับเหมาที่เชี่ยวชาญตรงกันมีประสิทธิภาพกว่า การเพิ่มทรัพยากรเพียงอย่างเดียว และกรอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการอสังหาริมทรัพย์ประเภทอื่นที่มีลักษณะการดำเนินงานใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: การก่อสร้างบ้าน, การจำลองสถานการณ์, โปรแกรม Arena, การจัดการทรัพยากร

Abstract

The delivery process in housing development projects exhibits queuing system characteristics, where delays directly affect customer satisfaction. This study investigated and analyzed delivery process management across four housing development projects in Bangkok and its metropolitan areas, using real data collected from 74 housing units over 12 months (January-December 2022). The primary objectives were to identify key problems and delay factors, and to evaluate improvement strategies through queueing theory-based simulation. Data analysis revealed that the main problems stem from end-of-quarter concentration of property bookings and transfers, combined with insufficient subcontractor numbers and unbalanced workload distribution, resulting in an average customer waiting time of 8.64 days and an average total time in system of 33.14 days per unit. This study applied Arena Discrete-Event Simulation (DES) with 500 replications to test two improvement scenarios: Scenario 1 — increasing the number of subcontractors from 2 to 3, and Scenario 2 — segmenting customers and subcontractors based on work complexity. Simulation results showed that Scenario 1 reduced average waiting time to 2.86 days and total system time to 25.48 days. Scenario 2

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Lat Krabang, Bangkok 10520, Thailand

* Corresponding Author. E-mail: 65016129@kmitl.ac.th

Received: May 19, 2026; Revised: June 19, 2026; Accepted: July 8, 2026

produced superior outcomes, reducing value-added activity duration to 18.14 days and total time in system to 24.51 days, while balancing subcontractor utilization at 9.94% and 9.87% respectively, with total inspection costs remaining constant at 75,000 Baht. The findings demonstrate that customer segmentation with specialized subcontractor assignment outperforms simply adding resources, and the simulation framework can be applied to other real estate projects with similar operational characteristics.

Keywords: housing construction, simulation, Arena software, resource management

บทนำ

กระบวนการส่งมอบบ้านในโครงการบ้านจัดสรรมีลักษณะของระบบแถวคอย คือมีบ้านที่รอรับการตรวจและเก็บงาน เข้ามาใช้ทรัพยากรผู้รับเหมาที่มีจำนวนจำกัด เมื่อปริมาณงานเกินกว่าขีดความสามารถของผู้รับเหมาจะเกิดแถวคอยและส่งผลโดยตรงต่อความพึงพอใจของลูกค้า โครงการบ้านจัดสรรในงานวิจัยนี้เป็นทาวน์โฮม 2 ชั้น ขนาดพื้นที่ใช้สอยเฉลี่ย 100-150 ตารางเมตร โดยขอบเขตงานของผู้รับเหมาครอบคลุมเฉพาะการเก็บงานก่อนส่งมอบลูกค้า ซึ่งได้แก่ การตรวจสอบและแก้ไขงานที่ยังไม่เรียบร้อยภายในบ้าน เช่น งานสี งานพื้น และงานระบบต่าง ๆ งานวิจัยนี้จึงใช้โปรแกรม Arena ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นบนพื้นฐานของทฤษฎีแถวคอยในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาความล่าช้าในกระบวนการส่งมอบบ้าน การจำลองด้วยโปรแกรม Arena ช่วยให้เราสามารถทดสอบแนวทางปรับปรุงได้ก่อนนำไปใช้จริง เช่น การเพิ่มจำนวนผู้รับเหมา การแบ่งกลุ่มลูกค้า และการปรับสมดุลการจัดสรรงาน เพื่อลดเวลารอคอยและเพิ่มประสิทธิภาพการส่งมอบบ้านในโครงการบ้านจัดสรร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถจำแนกได้สองกลุ่มหลัก ได้แก่ งานที่ใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Arena หรือ DES ในการวิเคราะห์กระบวนการก่อสร้าง และงานที่วางรากฐานทางทฤษฎีแถวคอยซึ่งเป็นหลักการเบื้องหลังการทำงานของโปรแกรม Arena (Altioik & Melamed, 2007; Rockwell Automation, 2024) ด้านการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์ระบบแถวคอยในงานก่อสร้าง Wee et al., (2022) พัฒนาแบบจำลองคิวที่ขึ้นอยู่กับการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดสรรทีมเทคนิคกริต ส่งผลให้ต้นทุนลดลง 26.27 เปอร์เซ็นต์ Abbaspour et al., (2022) รวมระบบคิว M/M/C กับการกำหนดเส้นทางยานพาหนะและการจัดการสินค้าคงคลังผ่าน Markov chain ในห่วงโซ่อุปทานก่อสร้าง Teknomo (2012a, 2012b) นำทฤษฎีคิว M/M/s มาสร้างกฎพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ระบบคิวในงานก่อสร้าง เช่น การเทคนิคกริตและการขนย้ายดิน Kim et al., (2021) วิเคราะห์เชิงปริมาณของความยาวและเวลารอในกิจกรรมโครงสร้างอาคาร โดยใช้แบบจำลองคิวกำหนด customer เป็นหน่วยงานก่อสร้างและ server เป็นทีมงาน Usmanov & Jarský (2023) จำลองงานดินเพื่อหาจำนวนเครื่องจักรที่เหมาะสมและลดต้นทุนรวม และ Ham & Yuh (2023) ประยุกต์ใช้ระบบคิวลำดับความสำคัญในการจัดการคำร้องขอข้อมูล BIM ในขั้นตอนการก่อสร้าง

การจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งโปรแกรม Arena เป็นตัวแทนสำคัญ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอย่างหลากหลาย Shiji et al., (2021) ใช้โปรแกรม Arena สร้างแบบจำลองซัพพลายเชนสำหรับโครงการก่อสร้างทางหลวง 62 โครงการ เพื่อลดเวลารอของอุปกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัสดุ Han & Lee (2024) ทบทวนการใช้ DES ในงานวิศวกรรมและการจัดการงานก่อสร้าง ครอบคลุม lean construction และการผสานกับ BIM Chen & Huang (2013) พัฒนาระบบ DES ร่วมกับ augmented reality สำหรับการขนส่งวัสดุในไซต์ก่อสร้าง Naeimi Rad & Maghrebi (2024) ผสาน DES กับ social force modeling เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพแรงงานในพื้นที่แออัด Zhang & Lin (2023) ใช้ DES ประเมินและควบคุมความเสี่ยงทางทรัพยากรในกระบวนการก่อสร้าง พบว่าแผนควบคุมที่เหมาะสมลดความแออัดได้ถึง 22 เปอร์เซ็นต์ Corrotea et al., (2024) ใช้ DES วิเคราะห์กระบวนการซ่อมบำรุงในบริษัทขนส่ง Su & Chang (2019) ผสาน DES กับเทคนิคพีซีซีเพื่อลดระยะเวลาการก่อสร้างจาก 36 เป็น 33 วัน และ González & Echaveguren (2012) จำลองการก่อสร้างถนนโดยรวมปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมเข้ากับการวิเคราะห์ต้นทุนและเวลา

งานวิจัยเหล่านี้ให้รากฐานทางทฤษฎีที่โปรแกรม Arena นำมาใช้ในการจำลอง Cheung et al. (2022) นำระบบคิวมาใช้ในการเครือข่ายโลจิสติกส์ย้อนกลับสำหรับการจัดการขยะก่อสร้าง Tao et al., (2024) ใช้กรอบ MCDM ร่วมกับ alternative queuing method ประเมินความเสี่ยงทางการยุทธศาสตร์ของโรงงาน Zeng et al., (2021) ศึกษาพฤติกรรมการต่อคิวในช่องทางอพยพ Huang & Su (2024) พัฒนาโมเดล M/M/1/WV สำหรับระบบบริการที่มีลูกค้าซึ่งมีความอดทนต่ำ Hassin et al., (2023) วิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลยุทธ์ในระบบคิวที่อัตราการมาถึงเป็นตัวแปรสุ่ม และ Kim et al., (2023) นำเสนอการวิเคราะห์สมดุลของระบบคิวลำดับความสำคัญแบบสังเกตได้บางส่วน หลักการจากงานวิจัยทั้งสองสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรม Arena ได้โดยตรง เนื่องจากโปรแกรม Arena รองรับการสร้างแบบจำลอง poisson process การกำหนดลำดับความสำคัญ และการวิเคราะห์เวลารอในระบบที่ซับซ้อน

นอกจากนี้ Athikulrat et al., (2023) ประยุกต์ใช้เทคนิคคะแนนปัจจัยร่วมกับสายธารคุณค่าเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตประกับรางสามารถลดระยะทางการขนย้าย 40 เมตร และเพิ่มผลผลิตได้ร้อยละ 6-10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์และจัดสรรทรัพยากรอย่างเป็นระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในทำนองเดียวกัน Kittidecha et al., (2023) ปรับปรุงผังโรงงานการผลิตเครื่องครัวสแตนเลสด้วยหลักการ CORELAP และวิธีการกราฟ โดยเปรียบเทียบทางเลือก 2 รูปแบบและคัดเลือกผังที่เหมาะสมที่สุด สามารถลดระยะทางการขนย้ายจาก 97.50 เมตร เหลือ 60 เมตร หรือลดลงร้อยละ 38.50 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางเลือกหลายรูปแบบอย่างเป็นระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการได้อย่างมีนัยสำคัญ

กล่าวโดยสรุป งานวิจัยกลุ่มแรกแสดงให้เห็นว่า DES/Arena เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการจำลองระบบแถวคอยที่ซับซ้อนในงานก่อสร้าง ขณะที่งานวิจัยกลุ่มที่สองให้รากฐานทฤษฎีแถวคอย M/M/c และ priority queuing ซึ่งเป็นหลักการเบื้องหลังที่สามารถนำมาประยุกต์กับปัญหาการส่งมอบบ้านในงานวิจัยนี้โดยตรง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ (1) เพื่อวิเคราะห์และระบุปัญหาที่ก่อให้เกิดความล่าช้าในกระบวนการส่งมอบบ้านในโครงการบ้านจัดสรร โดยใช้ทฤษฎีแถวคอยเป็นกรอบการวิเคราะห์ และ (2) เพื่อทดสอบแนวทางการปรับปรุงกระบวนการส่งมอบบ้านผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Arena เพื่อลดเวลารอคอยและเพิ่มประสิทธิภาพการจัดสรรทรัพยากร

วิธีการศึกษา

1. การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนหลัก 7 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การวิเคราะห์ปัญหาและกำหนดพารามิเตอร์ของระบบ (2) การเก็บรวบรวมข้อมูลจากโครงการจริง (3) การสร้างโมเดลด้วยโปรแกรม Arena (4) การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตรรกะของโมเดล (5) การตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลกับข้อมูลจริง (6) การออกแบบและดำเนินการจำลองสถานการณ์ และ (7) การวิเคราะห์ผลลัพธ์ทางสถิติ (Altiock & Melamed, 2007; Rockwell Automation, 2024) ดัง (Figure 1)

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนในการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูล ในช่วงเดือนมกราคม 2565 ถึงเดือนธันวาคม 2565 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 12 เดือน โดยเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ดังนี้

1. อัตราลูกค้าจองบ้านและโอนบ้าน
2. ระยะเวลาการรอคอยในระบบของลูกค้า

3. ระยะเวลาการรอคอยในแถวคอยของลูกค้า

4. ศึกษาเวลาการทำงาน

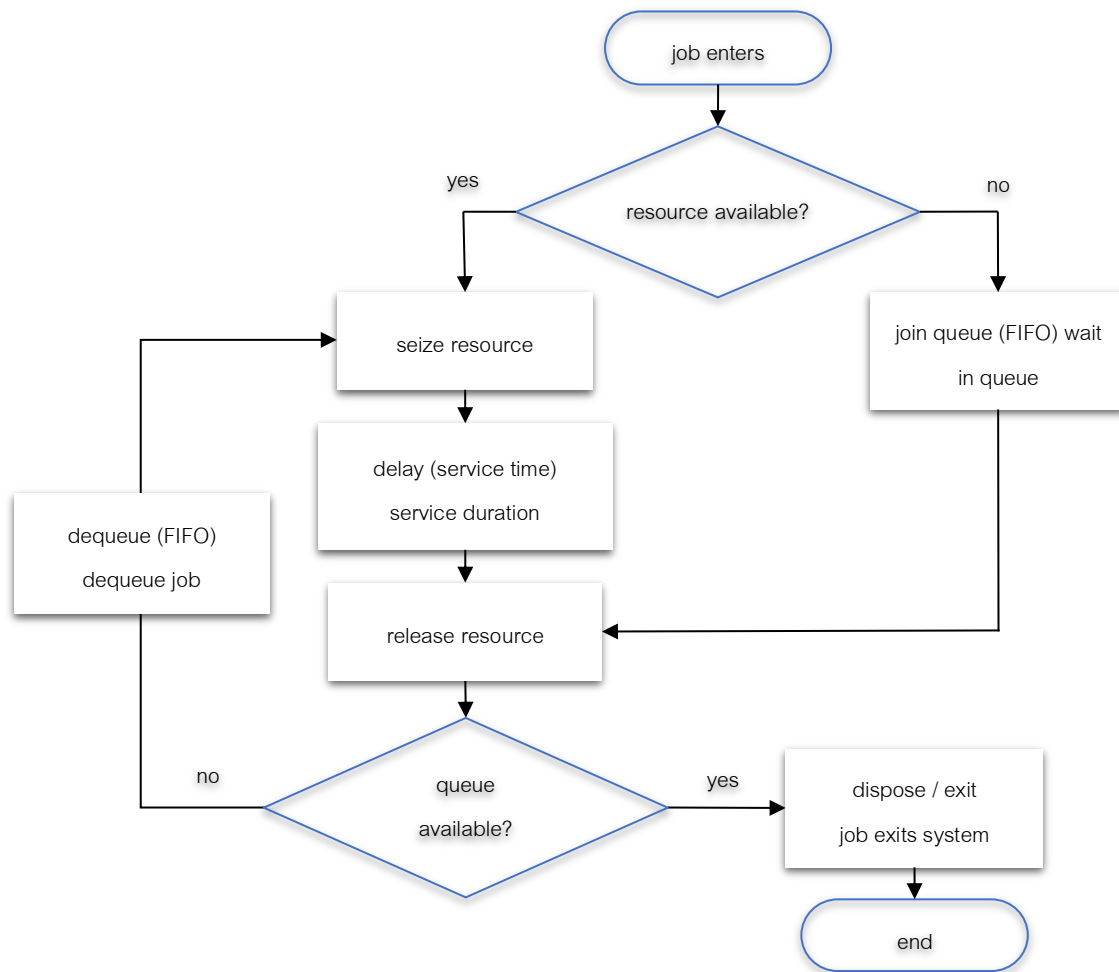


Figure 1 Basic queueing system simulation flowchart using Arena based on discrete-event simulation concept.

2.2 เครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล

2.2.1 แสดงการเก็บบันทึกข้อมูล (check sheet)

2.2.2 การศึกษาเวลาการทำงาน (time study)

Table 1 Summary of waiting time by customer group (days).

statistics	all 74 houses	63 houses	11 houses
minimum	6	6	31
maximum	45	30	45
mean	23	20	38
mode	27	27	32

note: 63 houses = normal customers with satisfactory subcontractor work; 11 houses = detail-demanding customers with unsatisfactory subcontractor work; = not applicable.

จาก (Table 1) แสดงการเปรียบเทียบสถิติเวลารอคอยของบ้านแบ่งตามกลุ่มลูกค้า พบว่าภาพรวมทั้ง 74 หลังมีเวลารอคอยเฉลี่ย 23 วัน ค่าต่ำสุด 6 วัน และสูงสุด 45 วัน เมื่อแบ่งกลุ่มลูกค้าออกเป็น 2 กลุ่ม พบความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยกลุ่มลูกค้าปกติที่ผู้รับเหมาเก็บงานเรียบร้อยจำนวน 63 หลังมีเวลารอคอยเฉลี่ยเพียง 20 วัน และค่าสูงสุดไม่เกิน 30 วัน ในขณะที่กลุ่มลูกค้าละเอียดยกกว่าปกติที่ผู้รับเหมาเก็บงานไม่เรียบร้อยจำนวน 11 หลังมีเวลารอคอยเฉลี่ยสูงถึง 38 วัน และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 31 วัน ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยภาพรวมอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นว่างานที่มีความซับซ้อนสูงส่งผลกระทบต่อระยะเวลารอคอยของลูกค้าอย่างชัดเจน

2.3 กระบวนการดำเนินการวิจัย

ผู้ศึกษาได้สร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Arena ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง โดยก่อนปรับปรุงใช้ผู้รับเหมา 2 รายตามที่ใช้จริง และหลังการปรับปรุงแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 เพิ่มจำนวนผู้รับเหมาเป็น 3 ราย โดยไม่มีการบริหารจัดการการขาย และรูปแบบที่ 2 เพิ่มจำนวนผู้รับเหมาเป็น 3 รายพร้อมแบ่งลูกค้าออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะงาน โดย (Figure 2) แสดงตัวอย่างผังโมเดลการจำลองสถานการณ์รูปแบบที่ 2 ซึ่งมีการแยก Process การเก็บงานออกเป็น 2 เส้นทางตามประเภทลูกค้า

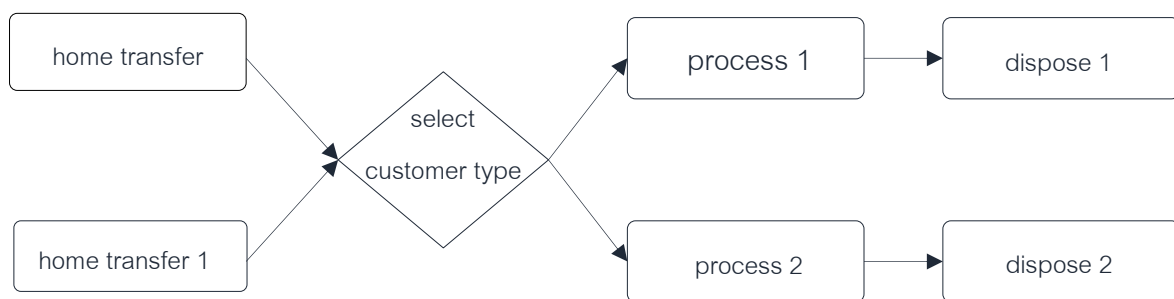


Figure 2 Example simulation model layout using Arena software.

2.4 กระบวนการวิเคราะห์ก่อนการปรับปรุงเวลาการรอคอยของลูกค้าจองและโอนบ้านด้วยโปรแกรม Arena การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ก่อนการปรับปรุง ดัง (Table 2)

2.5 กระบวนการวิเคราะห์หลังการปรับปรุงเวลาการรอคอยของลูกค้าจองและโอนบ้านด้วยโปรแกรม Arena รูปแบบที่ 1

Scenario 1 ใช้การตั้งค่าพารามิเตอร์เดียวกับ (Table 2) ทุกประการ ยกเว้นเพิ่ม resource capacity จาก 2 เป็น 3 ราย (ผู้รับเหมา 3 ราย) โดย queue type ยังคงเป็น FIFO และต้นทุนต่อหน่วยเท่าเดิมที่ 15,000 บาท

2.6 กระบวนการวิเคราะห์หลังการปรับปรุงเวลาการรอคอยของลูกค้าจองและโอนบ้านด้วยโปรแกรม Arena รูปแบบที่ 2

การจัดผู้รับเหมาใหม่โดยให้เก็บงานกระจายผู้รับเหมาหลังเว้นหลัง และควบคุมการขายของฝ่ายขายให้ครอบคลุมผู้รับเหมาทุกราย เพื่อไม่ให้ไหลตันกับผู้รับเหมารายใดรายหนึ่งจนเกินไป โดยลักษณะการจำลองจะจำลองให้มีลูกค้ากลุ่มปกติ หมายถึงลูกค้าที่ตรวจงานไม่ละเอียดจนเกินไป จำนวน 4 หลัง และหมายรวมถึงการที่ผู้รับเหมา 2 รายเก็บงานเรียบร้อยกว่าอีก 1 รายที่เหลือ ส่วนอีก 1 หลังสมมติฐานว่าเป็นลูกค้าที่ตรวจงานละเอียดเกินมาตรฐานและหมายรวมถึงผู้รับเหมาเก็บงานไม่เรียบร้อย การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์รูปแบบที่ 2 ดัง (Table 3)

Table 2 Arena simulation parameters and settings — before improvement.

module	parameter	setting value	remark
create	entity type	house	
(home transfer)	time between arrivals	random (expo), value=7, days	exponential distribution
	entities per arrival	1	
	max arrivals	5 units	max. no. of reserved and transferred houses
	first creation	0.0	
process 1	action	seize delay release	seize → delay → release
			resource
	priority	medium (2)	medium priority level
	resource	resource 1, Qty = 1	
	delay Type	triangular	triangular distribution
	min / most likely / max	6 / 23 / 45 days	min–most likely–max inspection duration
	allocation	value added	
resource 1	type	fixed capacity	
	capacity	2	subcontractor 2 firms
	per use cost	15,000 baht/unit	inspection cost per unit
	queue type	FIFO	queue when resource all 2 unit
	report statistics	✓	

note: ✓ = enabled; expo = exponential distribution; Qty = quantity

Table 3 Arena simulation settings — after improvement (scenario 2).

module	parameter	setting value	remark
create	entity type	house	
(home transfer)	time between arrivals	random (expo), value=7, days	exponential distribution
	entities per arrival	1	
	max arrivals	4 units	normal customers
	first creation	0.0	
create	entity type	house 1	
(home transfer 1)	time between arrivals	random (expo), value=7, days	exponential distribution
	entities per arrival	1	
	max arrivals	1 units	etail-demanding customers
	first creation	0.0	
decide (select customer type)	type	N-way by condition	
	conditions	entity type, house entity type, house 1	route by customer type

Table 3 Arena simulation settings — after improvement (scenario 2) (continue).

module	parameter	setting value	remark
process 1	action	seize delay release	seize → delay → release
	priority	medium (2)	medium priority level
	resource	resource 1, Qty = 1	normal customers
	delay type	triangular	triangular distribution
	min / most likely / max	6 / 20 / 30 days	inspection duration
	allocation	value added	
process 2	action	seize delay release	seize → delay → release
	priority	medium (2)	medium priority level
	resource	resource 2, Qty = 1	detail-demanding customers
	delay Type	triangular	triangular distribution
	min / most likely / max	31 / 38 / 45 days	inspection duration
	allocation	wait	
resource	resource 1 – type	fixed capacity	
	resource 1 – capacity	2	subcontractor for normal customers 2 firms
	resource 1 – per use	15,000 baht/unit	
	resource 2 – type	fixed capacity	
	resource 2 – capacity	1	subcontractor for detail-demanding customers 1 firm
	resource 2 – per use	15,000 baht/unit	

note: ✓ = enabled; expo = exponential distribution; Qty = quantity

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

หลังจากการจำลองสถานการณ์และได้ทำการคำนวณค่าสถิติต่าง ๆ แล้วนั้น แสดงให้เห็นว่า แนวทางในการเพิ่มจำนวนผู้รับเหมา นั้นมีผลให้การให้บริการมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดย เวลาก่อนการปรับปรุงเป็นเวลา que ที่ผู้ศึกษาเก็บข้อมูลมาจากการจับเวลาการรอคอยของลูกค้าของลูกค้านั้นจำนวน 74 หลัง และเวลาหลังการปรับปรุงคือเวลาที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Arena เพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงต่อไป ดัง (Tables 4-6) ผลการจำลองสถานการณ์หลังการปรับปรุงรูปแบบที่ 1 (scenario 1) ดัง (Table 5) และผลการจำลองสถานการณ์หลังการปรับปรุงรูปแบบที่ 2 (scenario 2) ดัง (Table 6)

Table 4 Simulation results before improvement (500 replications, time unit: days, 2 subcontractors).

indicator	mean	minimum	maximum	unit
entity — time				
value-added time (VA time)	24.49	6.34	44.24	days
waiting time	8.64	0	52.16	days
total time in system	33.14	6.34	87.28	days

Table 4 Simulation results before improvement (500 replications, time unit: days, 2 subcontractors) (continue).

indicator	mean	minimum	maximum	unit
entity — cost and volume				
inspection cost per unit	15,000	-	-	baht
work-in-progress (WIP)	0.83	0	5	units
houses entered / exited system	5	-	-	units
queue				
<i>queue waiting time</i>	<i>8.64</i>	<i>0</i>	<i>52.16</i>	<i>days</i>
<i>no. of houses waiting in queue</i>	<i>0.22</i>	<i>0</i>	<i>3</i>	<i>units</i>
subcontractor				
subcontractor utilization rate	30.62%	0.00%	100%	-
no. of active subcontractors	0.61	0	2	persons
no. of times subcontractor was used	5	-	-	times
total inspection cost	75,000	-	-	baht

note: Italic values (waiting time, total time in system, queue waiting time, no. of houses in queue) indicate system instability (arrival rate > service capacity); - = not applicable.

Table 5 Simulation results after improvement — scenario 1 (499 replications, time unit: days, 3 subcontractors).

indicator	mean	minimum	maximum	unit
entity — time				
value-added time (VA time)	22.62	19.06	31.49	days
<i>waiting time</i>	<i>2.86</i>	<i>0</i>	<i>10.07</i>	<i>days</i>
<i>total time in system</i>	<i>25.48</i>	<i>19.06</i>	<i>31.81</i>	<i>days</i>
entity — cost and volume				
inspection cost per unit	15,000	15,000	15,000	baht
queue				
<i>queue waiting time</i>	<i>2.86</i>	<i>0</i>	<i>10.07</i>	<i>days</i>
<i>no. of houses waiting in queue</i>	<i>0.07</i>	<i>0</i>	<i>2</i>	<i>units</i>
subcontractor				
subcontractor utilization rate	18.85%	0.00%	100%	-
no. of active subcontractors	0.57	0	3	persons
no. of times subcontractor was used	5	-	-	times
total inspection cost	75,000	-	-	baht

note: Italic values indicate metrics to monitor for performance evaluation; - = not applicable

Table 6 Simulation results after improvement — Scenario 2 (499 replications, time unit: days, 3 subcontractors in 2 groups).

indicator	group	mean	minimum	maximum	unit
entity — time					
value-added time (VA time)	normal customers (house)	18.14	15.75	22.85	days
value-added time (VA time)	detail-demanding customers (house 1)	0	0	0	days
<i>waiting time</i>	<i>normal customers (house)</i>	<i>6.37</i>	<i>0</i>	<i>13.69</i>	<i>days</i>
<i>waiting time</i>	<i>detail-demanding customers (house 1)</i>	<i>36.02</i>	<i>36.02</i>	<i>36.02</i>	<i>days</i>
<i>total time in system</i>	<i>normal customers (house)</i>	<i>24.51</i>	<i>15.75</i>	<i>30.43</i>	<i>days</i>
<i>total time in system</i>	<i>detail-demanding customers (house 1)</i>	<i>36.02</i>	<i>36.02</i>	<i>36.02</i>	<i>days</i>
entity — cost					
inspection cost per unit	normal customers (house)	15,000	15,000	15,000	baht
inspection cost per unit	detail-demanding customers (house 1)	0	0	0	baht
queue					
<i>queue waiting time</i>	<i>process 1 (normal customers)</i>	<i>6.37</i>	<i>0</i>	<i>13.69</i>	<i>days</i>
<i>queue waiting time</i>	<i>process 2 (detail-demanding customers)</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>days</i>
<i>no. of houses waiting in queue</i>	<i>process 1 (normal customers)</i>	<i>0.07</i>	<i>0</i>	<i>2</i>	<i>units</i>
<i>no. of houses waiting in queue</i>	<i>process 2 (detail-demanding customers)</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>units</i>
subcontractor					
subcontractor utilization rate	subcontractor group 1 (resource 1)	9.94%	0.00%	100%	-
subcontractor utilization rate	subcontractor group 2 (resource 2)	9.87%	0.00%	100%	-
no. of active subcontractors	subcontractor group 1 (resource 1)	0.2	0	2	persons
no. of active subcontractors	subcontractor group 2 (resource 2)	0.1	0	1	persons
no. of times subcontractor was used	subcontractor group 1 (resource 1)	4	-	-	times
no. of times subcontractor was used	subcontractor group 2 (resource 2)	1	-	-	times
total inspection cost	subcontractor group 1 (resource 1)	60,000	-	-	baht
total inspection cost	subcontractor group 2 (resource 2)	15,000	-	-	baht

note: Italic values indicate metrics to monitor for performance evaluation; - = not applicable

(Figure 3) แสดงกระบวนการส่งมอบบ้านก่อนการปรับปรุง โดยใช้ผู้รับเหมา 2 ราย ในระบบแถวคอยแบบ FIFO ลูกค้าที่จองและโอนบ้านเข้าสู่แถวคอยและรอให้ผู้รับเหมาว่างจึงจะได้รับการเก็บงานซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าเฉลี่ย 8.64 วัน และเวลารวมในระบบสูงถึง 33.14 วัน อันเนื่องมาจากการกระจุกตัวของงานในช่วงปลายไตรมาสและจำนวนผู้รับเหมาที่ไม่เพียงพอ

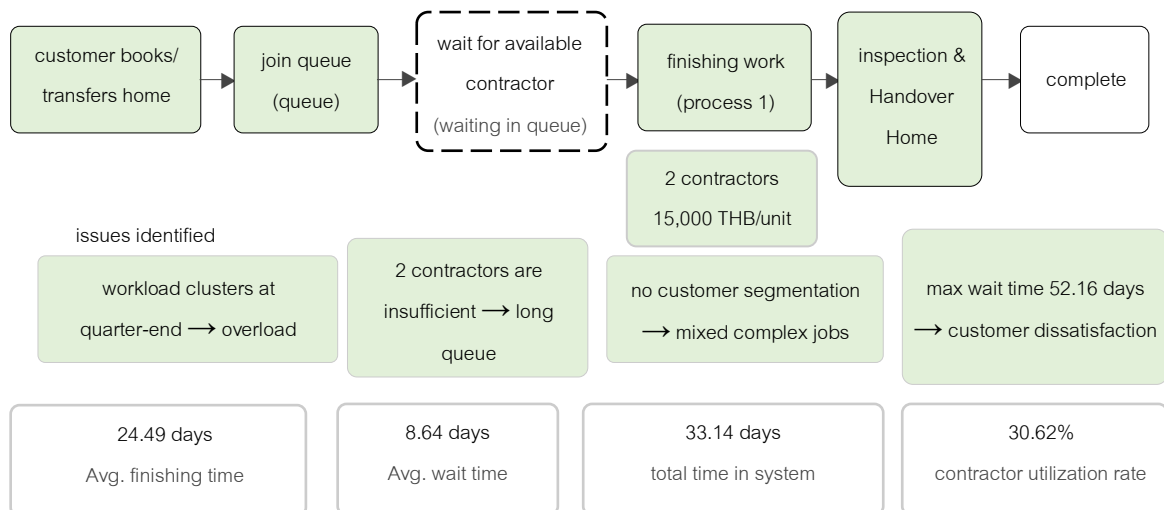


Figure 3 House delivery process before improvement 2 contractors, FIFO queue system.

(Figure 4) แสดงกระบวนการส่งมอบบ้านหลังการปรับปรุงรูปแบบที่ 2 (scenario 2) ซึ่งเพิ่มผู้รับเหมาเป็น 3 ราย และแบ่งลูกค้าออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะงาน ได้แก่ กลุ่ม A ลูกค้าปกติ 63 หลัง (เวลาเก็บงาน 6-30 วัน) และกลุ่ม B ลูกค้าละเอียด 11 หลัง (เวลาเก็บงาน 31-45 วัน) การแบ่งกลุ่มนี้ทำให้เวลาเก็บงานลดลงเหลือ 18.14 วัน เวลารวมในระบบลดลงเหลือ 24.51 วัน และอัตราการใช้งานผู้รับเหมาสมดุลที่ 9.94 เปอร์เซ็นต์ และ 9.87 เปอร์เซ็นต์ โดยต้นทุนรวมยังคงเท่าเดิมที่ 75,000 บาท

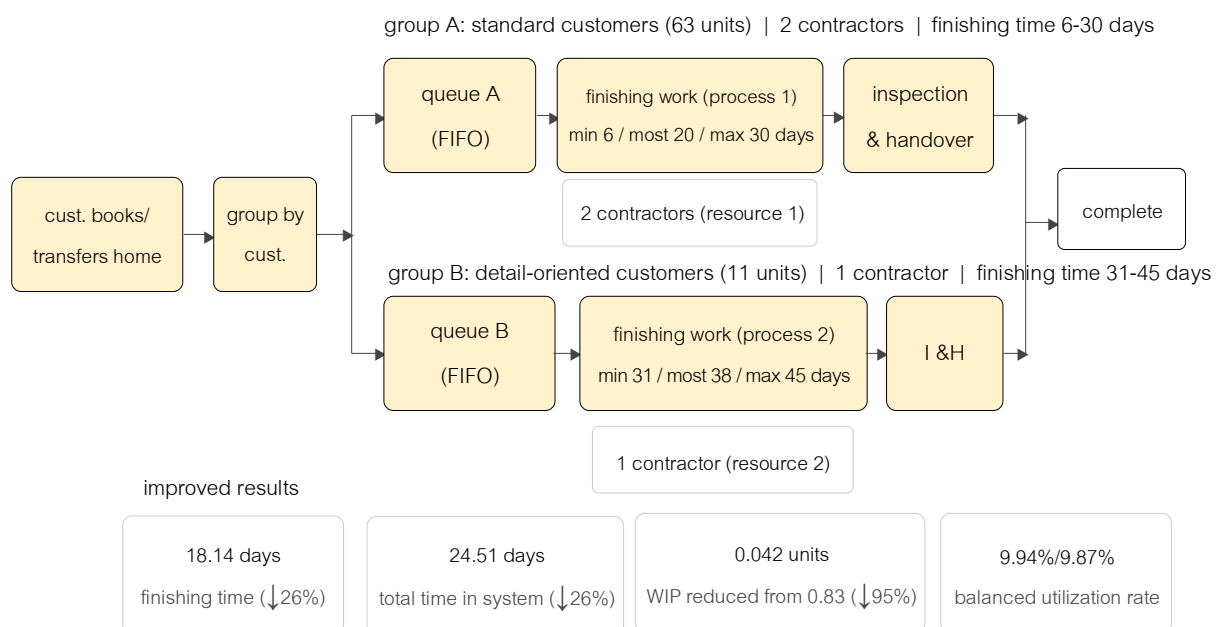


Figure 4 House delivery process after improvement — scenario 2: 3 contractors divided into 2 groups by customer type.

การเปรียบเทียบผลการจำลองก่อนและหลังปรับปรุงด้วยโปรแกรม Arena ใน (Table 7) พบว่าการปรับปรุงทั้งสองรูปแบบช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเวลาเก็บงานที่สร้างมูลค่าลดลงจาก 24.49 วันก่อนปรับปรุง เหลือ 22.62 วันในรูปแบบที่ 1 และ 18.10 วันในรูปแบบที่ 2 เวลารวมในระบบลดลงจาก 33.14 วัน เหลือ 25.48 วันและ 24.51 วัน ตามลำดับ จำนวนงานค้างในระบบลดลงจาก 0.83 หลัง เหลือเพียง 0.042 หลังในรูปแบบที่ 2 แม้ว่าเวลารอคอยในแถวคอยของรูปแบบที่ 1 จะต่ำที่สุดที่ 2.86 วัน ขณะที่รูปแบบที่ 2 กลุ่มที่ 1 มีค่าสูงขึ้นที่ 6.37 วัน แต่กลุ่มที่ 2 ไม่มีการรอคอยเลย และต้นทุนรวมยังคงเท่ากันทุกรูปแบบที่ 75,000 บาท โดยรูปแบบที่ 2 ถือว่าเหมาะสมที่สุดในภาพรวมเนื่องจากให้เวลาเก็บงานและเวลารวมในระบบต่ำที่สุด พร้อมทั้งการกระจายงานระหว่างผู้รับเหมาที่สมดุลกว่า

Table 7 Comparison before and after improvement using Arena simulation.

comparison Item	before improvement	after improvement scenario 1	after improvement scenario 2	trend description
no. of subcontractors - resource (persons)	2	3	2 (P1), 1 (P2)	added subcontractors in scenario 1 and split into 2 groups in scenario 2
subcontractor usage cost - usage cost (baht)	75,000	75,000	60,000 (R1) 15,000 (R2)	equal in both scenario 1 but split in scenario 2 split into resource 1 and resource 2
value-added activity duration - VA time average (days)	24.49	22.61	18.14	VA time continuously decreasing in both improvement scenarios
value-added process cost - VA cost total (baht)	75,000	75,000	75,000	VA cost equal across all scenarios
average time in system - total time (days)	33.14	25.48	24.51 (P1), 0 (P2)	total time decreases in all improvement scenarios; lowest in scenario 2
Avg. no. of customers in system - WIP average (units)	0.83	0.58	0.023 (P1), 0.019 (P2)	WIP significantly reduced in scenario 1 and further reduced in scenario 2 (combined)
Avg. no. of customers in queue - number waiting (units)	0.22	0.07	0.0698 (P1), 0 (P2)	number waiting reduced in scenario 1 and slightly reduced in scenario 2 (combined)
Avg. wait time in queue - wait time average (days)	8.64	2.86	6.37 (P1), 0 (P2)	wait time reduced in scenario 1 but slightly increased in scenario 2
subcontractor utilization rate - utilization (%)	30.62	18.85	9.94 (P1), 9.87 (P2)	utilization reduced in scenario 1 and slightly increased in scenario 2 (combined = 19.927)

note: P1 = process 1 (resource 1); P2 = process 2 (resource 2); VA = value-added; WIP = work in progress; R1 = resource 1; R2 = resource 2.

ผลการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับหลักการพื้นฐานของระบบคิว M/M/c ที่เมื่อเพิ่มจำนวนช่องให้บริการ (c) จากสองเป็นสามหน่วย ความหนาแน่นการให้บริการของระบบลดลง ส่งผลให้เวลารอคอยเฉลี่ยในแถวคอยและเวลารวมในระบบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่ออัตราการใช้งานผู้รับเหมาต่อหน่วยลดลงจาก 30.62 เปอร์เซนต์ เหลือ 18.85 เปอร์เซนต์ ในรูปแบบที่ 1 และ 9.94-9.87 เปอร์เซนต์ ในรูปแบบที่ 2 แสดงว่าระบบเคลื่อนออกจากสภาวะหนาแน่นไปสู่สภาวะที่มีกันชนเพียงพอรองรับความแปรปรวนของอัตราการมาถึงของลูกค้า โดยเฉพาะในช่วงปลายไตรมาสที่มีการกระจุกตัวของการจองและโอน

ผลการศึกษาที่พบว่า การแบ่งกลุ่มลูกค้าตามลักษณะงานดังรูปแบบที่ 2 ช่วยลดเวลาเก็บงานเฉลี่ยได้ดีกว่าการเพิ่มจำนวนผู้รับเหมาเพียงอย่างเดียวดังรูปแบบที่ 1 สอดคล้องกับแนวคิด priority queuing ที่ Ham และ Yuh (Ham & Yuh, 2023) นำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการสนับสนุน BIM โดยการจัดกลุ่มงานและกำหนดลำดับความสำคัญอย่างชัดเจนสามารถลดความหนาแน่นของระบบได้มีประสิทธิภาพกว่าการเพิ่มทรัพยากรโดยไม่มีการแบ่งประเภทงาน ในทำนองเดียวกัน (Kim et al., 2021) พบว่าการวิเคราะห์ปริมาณงานรอในระบบก่อสร้างอพาร์ทเมนต์ในเกาหลีโดยใช้โมเดลคิวช่วยให้สามารถจัดสรรทรัพยากรได้ตรงเป้าหมายมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ที่แสดงให้เห็นว่า work-in-progress (WIP) ลดลงจาก 0.83 เหลือ 0.042 (P1+P2) หลังเมื่อใช้รูปแบบที่ 2

อย่างไรก็ตาม อัตราการใช้งานผู้รับเหมาในทุกรูปแบบที่ต่ำกว่า 31 เปอร์เซนต์ สะท้อนให้เห็นว่าข้อมูลในการศึกษาค้างนี้ครอบคลุมเพียง 5 หลังต่อรอบการจำลอง ซึ่งอาจไม่สะท้อนสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในช่วง peak season ที่อาจมีการจองและโอนพร้อมกันมากกว่านี้ อันเป็นประเด็นที่ควรขยายขอบเขตการจำลองในงานวิจัยอนาคต โดยเพิ่ม max arrivals ให้สอดคล้องกับข้อมูลจริงที่เก็บได้ 74 หลัง เพื่อให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือเชิงสถิติมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ (Wee et al., 2022) ที่ใช้โมเดลคิวในงานก่อสร้างขนาดใหญ่สามารถลดต้นทุนได้ 26.27 เปอร์เซนต์ ในขณะที่งานวิจัยนี้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงต้นทุนรวมคงที่ที่ 75,000 บาท เนื่องจากจำนวนบ้านที่เข้ารับบริการเท่ากัน แต่ประโยชน์ที่แท้จริงสะท้อนผ่านการลดเวลารอคอยและการกระจายงานที่สมดุลกว่า ซึ่งในระยะยาวอาจส่งผลต่อต้นทุนทางอ้อม เช่น ค่าปรับจากการส่งมอบล่าช้าและต้นทุนความไม่พึงพอใจของลูกค้า

ในเชิงวิชาการ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการอบแนวคิด discrete-event simulation (DES) ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างระบบโครงสร้างพื้นฐาน เช่น การเทคอนกรีต การขนส่งวัสดุ และงานดิน (Wee et al., 2022; Teknomo, 2012a, 2012b; Han & Lee, 2024) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการส่งมอบบ้านในโครงการอสังหาริมทรัพย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทยที่ยังไม่มีงานวิจัยในด้านนี้มาก่อน นับเป็นการเติมเต็มช่องว่างทางวรรณกรรมและขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ DES สู่กระบวนการ post-construction ที่มีความสำคัญต่อความพึงพอใจของลูกค้า

ในเชิงปฏิบัติ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงนัยสำคัญสำหรับผู้ประกอบการอสังหาริมทรัพย์ในหลายมิติ ประการแรก การกระจุกตัวของ การจองและโอนในช่วงปลายไตรมาสเป็นปัญหาเชิงโครงสร้างที่เกิดจากนโยบายการขายและแรงจูงใจทางการตลาด ซึ่งสามารถบรรเทาได้ด้วยการออกแบบแผนการขายให้กระจายสม่ำเสมอตลอดไตรมาส ประการที่สอง การแบ่งประเภทลูกค้าและจับคู่กับผู้รับเหมาที่มีความเชี่ยวชาญตรงกันเป็นกลยุทธ์ที่มีต้นทุนเท่าเดิม แต่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า ประการที่สาม รูปแบบการจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการคอนโดมิเนียม (condominium) หรือโครงการอสังหาริมทรัพย์เชิงพาณิชย์ที่มีกระบวนการส่งมอบที่คล้ายคลึงกัน โดยปรับพารามิเตอร์การแจกแจงของเวลาเก็บงานให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละโครงการ

สรุป

จากการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลในโครงการบ้านจัดสรร พบว่าในช่วงเดือนสุดท้ายของแต่ละไตรมาสมีปริมาณการจองและการโอนกรรมสิทธิ์สูงกว่าเดือนแรกและเดือนที่สองของไตรมาส ซึ่งทำให้กระบวนการเก็บงานบ้านเพื่อส่งมอบลูกค้าเกิดปัญหา ทั้งในเรื่องความล่าช้าและความไม่สมดุลของการจัดสรรทรัพยากร โดยเฉพาะจำนวนผู้รับเหมาที่ไม่เพียงพอส่งผลให้บ้านบางหลังใช้เวลานานในการเก็บงาน และลูกค้าบางรายต้องรอคอยเป็นระยะเวลานาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของลูกค้าโดยตรง

ปัญหาหลักที่พบคือ การกระจายการขายบ้านในแต่ละช่วงเวลาไม่ได้ถูกควบคุมให้สอดคล้องกับความสามารถของผู้รับเหมา ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลในงานของผู้รับเหมา บางรายมีปริมาณงานมากเกินไป ขณะที่บางรายมีปริมาณงานน้อยหรือไม่มีงานเลย ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้า ได้แก่ (1) การกระจุกตัวของ การจองและโอนกรรมสิทธิ์ในช่วงปลายไตรมาส อันเกิดจากนโยบายการขายและแรงจูงใจทางการตลาด (2) จำนวนผู้รับเหมาที่ไม่เพียงพอต่อปริมาณงาน และ (3) การขาดการแบ่งประเภทลูกค้าตามลักษณะความซับซ้อนของงาน ทั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้โปรแกรม Arena เพื่อจำลองสถานการณ์สำหรับทดสอบแนวทางการแก้ไขที่เหมาะสม

ผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 2 รูปแบบแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพที่ชัดเจน โดยรูปแบบที่ 1 สามารถลดเวลารอคอยจาก 8.64 วัน เหลือเพียง 2.86 วัน และลดเวลารวมในระบบจาก 33.14 วัน เหลือ 25.48 วัน ขณะที่รูปแบบที่ 2 ให้ผลดียิ่งกว่า โดยลดเวลาเก็บงานเฉลี่ยเหลือ 18.14 วัน และลดเวลารวมในระบบเหลือ 24.51 วัน พร้อมทั้งกระจายงานระหว่างผู้รับเหมาได้สมดุลกว่า สะท้อนจากอัตราการใช้งานผู้รับเหมาที่ใกล้เคียงกันทั้ง 2 กลุ่ม (9.94 และ 9.87 เปอร์เซ็นต์)

ผลการจำลองสถานการณ์พบว่า รูปแบบที่ 2 มีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาการรอคอยในกระบวนการส่งมอบบ้านได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยให้ผู้รับเหมาทุกรายมีปริมาณงานที่สมดุล ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงที่เกิดจากความไม่สมดุลในการจัดการทรัพยากร และทำให้ลูกค้าบางรายได้รับบริการเร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดความพึงพอใจโดยรวม

ข้อจำกัดของการวิจัย: งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลจากโครงการบ้านจัดสรร 4 โครงการในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระยะเวลา 12 เดือน จำนวน 74 หลัง ซึ่งอาจจำกัดการนำไปใช้กับโครงการในพื้นที่อื่นหรือขนาดที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การจำลองสถานการณ์ใช้การมาถึงสูงสุดเพียง 5 หลังต่อรอบ ซึ่งอาจไม่สะท้อนสภาพจริงในช่วงลูกค้ามากกว่าปกติได้อย่างครบถ้วน

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต: ควรขยายขอบเขตการจำลองโดยเพิ่ม max arrivals ให้สอดคล้องกับข้อมูลจริง 74 หลัง และนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้กับโครงการคอนโดมิเนียม หรืออสังหาริมทรัพย์เชิงพาณิชย์ประเภทอื่น รวมถึงการผสมปัจจัยด้านความผันแปรตามฤดูกาล เข้าสู่แบบจำลองเพื่อรองรับการวิเคราะห์ในช่วงลูกค้ามากกว่าปกติ และลูกค้าน้อยกว่าปกติอย่างครบวงจร

เอกสารอ้างอิง

- Abbaspour, S., Aghsami, A., Jolai, F., & Yazdani, M. (2022). An integrated queueing-inventory-routing problem in a green dual-channel supply chain considering pricing and delivery period: A case study of construction material supplier. *Journal of Computational Design and Engineering*, 9(5), 1917-1951. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwac089>
- Altio, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation modeling and analysis with Arena*. Academic Press.

- Athikulrat, K., Praisont, C., & Jangruksakul, S. (2023). Application of factor rating for production layout selection to improve production: Case study rail joint production. *RMUTSB Academic Journal*, 11(2), 223-238. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/258628>
- Chen, H. M., & Huang, P. H. (2013). 3D AR-based modeling for discrete-event simulation of transport operations in construction. *Automation in Construction*, 33, 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.015>
- Cheung, W. M., Xiao, X., Choy, K. L., & Chiu, C. H. (2022). Managing inert construction waste through queuing theory in reverse logistics network. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101585. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101585>
- Corrotea, H., Portales, H., Amigo, L., Gatica, G., Troncoso-Palacio, A., Mondragon, D., & Ramos, M. (2024). Maintenance process analysis in a port cargo company through discrete event simulation. *Procedia Computer Science*, 231, 415-420. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.227>
- González, V., & Echaveguren, T. (2012). Exploring the environmental modeling of road construction operations using discrete-event simulation. *Automation in Construction*, 24, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.011>
- Ham, N. H., & Yuh, O. K. (2023). Performance analysis and assessment of BIM-based construction support with priority queuing policy. *Buildings*, 13(1), 153. <https://doi.org/10.3390/buildings13010153>
- Han, J., & Lee, S. (2024). Discrete event simulation in construction engineering and management: A scientometric review of research trends and applications. *Advanced Engineering Informatics*, 54, 101790. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.101790>
- Hassin, R., Haviv, M., & Oz, B. (2023). Strategic behavior in queues with arrival rate uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 309(1), 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.01.015>
- Huang, Z., & Su, X. (2024). Research on M/M/1/WV queuing system with single working vacation [Preprint]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3948469/v1>
- Kim, J. W., Ham, N., & Kim, J. J. (2021). Quantitative analysis of waiting length and waiting time for frame construction work activities using a queue model: Focusing on Korean apartment construction. *Sustainability*, 13(7), 3778. <https://doi.org/10.3390/su13073778>
- Kim, J., Park, S., & Lee, H. (2023). Equilibrium analysis of partially observable priority queuing systems. *European Journal of Operational Research*, 312(2), 589-602. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.06.021>
- Kittidecha, C., Saramath, S., & Narapinij, P. (2023). Plant layout improvement of the stainless-steel cookware manufacturing using CORELAP and graph-based method. *RMUTSB Academic Journal*, 11(1), 110-122. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/257060>
- Naeimi Rad, M., & Maghrebi, M. (2024). Bi-level integration of discrete-event simulation (DES) and social force modeling (SFM) for construction labor productivity. *Automation in Construction*, 160, 105317. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105317>

- Rockwell Automation. (2024). *Arena simulation software (Version 24.1)* [Computer software].
<https://www.arenasimulation.com>
- Shiji, P., Rangaswamy, K., & Chandramohan, A. (2021). Resource utilization analysis of highway projects using ARENA. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 33(2), 47-55.
<https://doi.org/10.11113/mjce.v33.16846>
- Su, T. S., & Chang, L. M. (2019). Development of the construction scheduling based on fuzzy discrete event simulation for a TFT-LCD plant. *Procedia Manufacturing*, 38, 1130-1137.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.201>
- Tao, Y., Hu, H., Xue, J., Zhang, Z., & Xu, F. (2024). Evaluation of ergonomic risks for construction workers based on multicriteria decision framework with the integration of spherical fuzzy set and alternative queuing method. *Sustainability*, 16(10), 3950. <https://doi.org/10.3390/su16103950>
- Teknomo, K. (2012a). *Application of queuing theory in construction management*. In D. Hardjito, A. Antoni, & I. Muljati (Eds.). *Developments in structural engineering and construction technology* (pp. 76-88). Petra Christian University.
- Teknomo, K. (2012b). Queuing rule of thumb based on M/M/s queuing theory with applications in construction management. *Civil Engineering Dimension*, 14(3), 139-146.
<https://doi.org/10.9744/ced.14.3.139-146>
- Usmanov, V., & Jarský, C. (2023). *Application of queuing theory in construction industry*. Department of Construction Technology, FCE, CTU Prague.
- Wee, K., Ham, N., & Kim, J. J. (2022). Microscopical resource allocation for large-scale apartment foundation work using queuing systems. *Buildings*, 12(2), 89. <https://doi.org/10.3390/buildings12020089>
- Zeng, M., Zhao, D., Yang, L., Lu, Y., Shi, L., & Zhao, H. (2021). Research on the impact of crowd queuing behavior on construction personnel evacuation. *E3S Web of Conferences*, 261, 03045.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126103045>
- Zhang, H., & Lin, Y. (2023). Modeling and evaluation of ergonomic risks and controlling plans through discrete-event simulation. *Automation in Construction*, 152, 104920.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104920>