

SAC-01-005

การวางแผนเส้นทางการย้ายตำแหน่งของรถเครนแบบเคลื่อนที่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการหาคำตอบ ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงอนุภาค

Optimal Mobile Crane Repositioning Route Planning Using Particle Swarm Optimization Method

ศุภวุฒิ มัลลิกฤษณะชลี¹, ธนกรุต ปิยะอมรกุล², ณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว³ และ พอจันทร์ ตฤณพิงษ์สวัสดิ์⁴

Suphawut Malaikrisanachalee¹, Thanakrit Piyaamornkul², Narongrit Wongwai³

& Porjan Tuttipongsawat⁴

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์¹, สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์², หน่วยปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมขนส่งและโครงสร้างพื้นฐาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรี
ราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา³, หน่วยปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา⁴

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University¹, Infrastructure Engineering and Management, Department
of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University², Transportation Engineering and Infrastructure Research Unit,
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus³,
The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering
at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus⁴
fengshu@ku.ac.th¹, Thanakrit.piya@ku.th², narongrit@eng.src.ku.ac.th³, porjan@eng.src.ku.ac.th⁴

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวางแผนการย้ายตำแหน่งของรถเครนแบบเคลื่อนที่โดยใช้ขั้นตอนวิธี
ฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เพื่อหาดำเนินงานจอดที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดทางกายภาพของไซต์ก่อสร้าง
โดยมุ่งลดระยะเวลาและต้นทุนในการดำเนินงาน โดยใช้ข้อมูลจำลองจากกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างโกดังซึ่งมีจุดติดตั้งวัสดุจำนวน
49 จุด แบบจำลองได้รับการพัฒนาในโปรแกรม MATLAB R2024b และใช้ Microsoft Excel สำหรับจัดเตรียมและประมวลผลข้อมูล
ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองสามารถลดระยะเวลาในการปฏิบัติงานได้เฉลี่ย 17.4% และลดจำนวนการเคลื่อนย้ายของเครนได้มากถึง
28.6% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการโปรแกรมเชิงไม่เชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง (DNLP) แบบจำลองสามารถระบุจุดจอดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
ในแต่ละกรณีทดลอง และมีความยืดหยุ่นสูงในการปรับใช้กับจำนวนจุดจอดและจุดกองวัสดุที่แตกต่างกัน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการ
เพิ่มจุดกองวัสดุจาก 1 เป็น 3 จุดสามารถลดระยะเวลาการทำงานได้สูงสุดถึง 22.9% ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของ PSO ในการเพิ่ม
ประสิทธิภาพการโลจิสติกส์ในงานก่อสร้าง

คำสำคัญ: การวางแผนเส้นทาง รถเครนแบบเคลื่อนที่ วิธีฝูงอนุภาค อัลกอริทึมเชิงเมตาฮิวริสติก การลดต้นทุน การจำลองใช้งาน
MATLAB การเพิ่มประสิทธิภาพ

Abstract

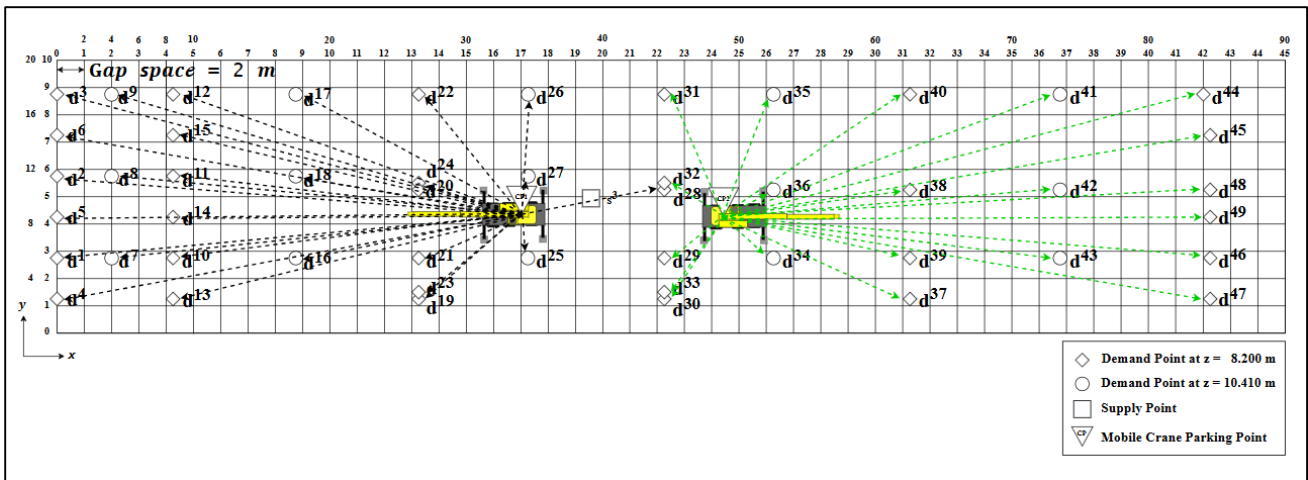
This research aims to develop a repositioning route planning model for mobile cranes using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to determine optimal parking positions under real-world site constraints. The objective is to reduce operation time and cost. A simulated case study involving 49 installation points in a warehouse construction project was used. The model was implemented using MATLAB R2024b, with input and result processing managed via Microsoft Excel. The results indicate that the PSO-based model reduced average operation time by 17.4% and crane repositioning frequency by 28.6% compared to Discontinuous Nonlinear Programming (DNLP). The model effectively identified optimal crane positions and demonstrated adaptability to varied numbers of crane and

material storage points. Notably, increasing material storage points from 1 to 3 yielded a maximum operation time reduction of 22.9%, confirming PSO's capability for optimizing construction logistics.

Keywords: route planning, mobile crane, particle swarm optimization, metaheuristic algorithm, cost reduction, site simulation, MATLAB, logistics optimization

บทนำ

ในการดำเนินงานก่อสร้างที่มีการติดตั้งวัสดุในหลายจุดทั่วพื้นที่ เช่น โครงการก่อสร้างโกดัง อาคารพาณิชย์ หรือโครงสร้างแนวราบขนาดใหญ่ การใช้รถเครนแบบเคลื่อนที่ (Mobile Crane) เป็นเครื่องมือหลักในการยกและติดตั้งวัสดุขนาดใหญ่ถือเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากรถเครนสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก ติดตั้งง่าย และใช้พื้นที่น้อยเมื่อเทียบกับเครนแบบหอสถู่ง อย่างไรก็ตาม การใช้รถเครนแบบเคลื่อนที่ในพื้นที่ก่อสร้างจริงกลับมีความท้าทายด้านการวางแผน เนื่องจากตำแหน่งของจุดจอดเครน จุดติดตั้งวัสดุ และจุดกองวัสดุมักไม่สัมพันธ์กัน ทำให้ต้องมีการเคลื่อนย้ายเครนหลายครั้ง ส่งผลให้ระยะเวลาการทำงานยืดเยื้อและต้นทุนเพิ่มขึ้น จากการศึกษาโดย Hozjan และ Klansek (2023) พบว่า การกำหนดตำแหน่งจอดรถเครนที่เป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการสูญเสียเวลาและต้นทุนในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะเมื่อมีจำนวนจุดติดตั้งมาก ความซับซ้อนของเส้นทางการย้ายตำแหน่งเครนจะเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณซึ่งตำแหน่งจุดจอดเครนแบบเคลื่อนที่มีลักษณะดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงพฤติกรรมของวิธีการหาคำตอบด้วยโปรแกรมเชิงไม่เชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง (DNLP)
ที่มา (ธนกฤต ปิยะอมรกุล, 2568, Hozjan และ Klansek, 2566)

จากภาพแสดงถึงตำแหน่งจุดจอดเครนแบบเคลื่อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทั้งหมด การศึกษาดังกล่าวใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงไม่เชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง (DNLP) ในการค้นหาตำแหน่งจอดที่เหมาะสม แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านความยืดหยุ่นและการประยุกต์ใช้กับไซต์งานที่มีโครงสร้างหลากหลาย

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาแบบจำลองการวางแผนเส้นทางการย้ายตำแหน่งของรถเครนแบบเคลื่อนที่ โดยใช้วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่งเป็นเทคนิคแบบเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมของฝูงนกและฝูงปลา (Kennedy & Eberhart, 1995) PSO มีข้อดีด้านความสามารถในการเข้าสู่คำตอบที่ดีได้รวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องใช้อนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสามารถปรับใช้งานได้ดีกับปัญหาที่มีข้อจำกัดหลากหลาย ซึ่งวิธีการหาคำตอบแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่ในปริภูมิคำตอบด้วยความเร็วและทิศทางที่พัฒนาตามประสบการณ์ของตนเองและของฝูงอนุภาค i ในรอบที่ t มีการอัปเดตความเร็วด้วยสมการ

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (p_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (g - x_i(t)) \quad (1)$$

โดยที่:

ω : แรงเฉื่อย ช่วยให้อนุภาคเคลื่อนไปในทิศทางเดิม

c_1, c_2 : ค่าส่งเสริมประสบการณ์ตนเองและกลุ่ม

r_1, r_2 : ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

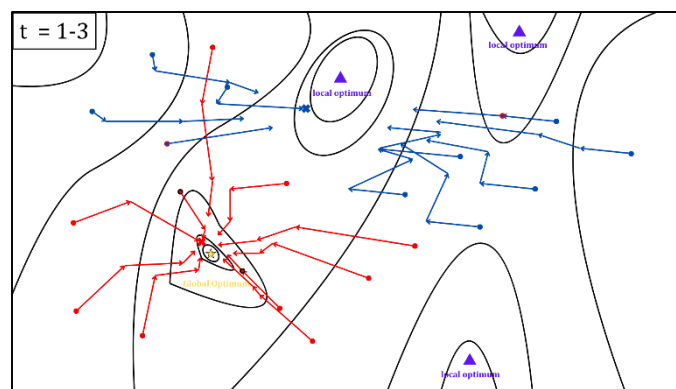
p_i : ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค

g : ตำแหน่งที่ดีที่สุดของทั้งฝูง

จากนั้นตำแหน่งของอนุภาคจะพัฒนาผลตามสมการย้ายตำแหน่งดังสมการที่ 2

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) – (2) จะสามารถแสดงพฤติกรรมของวิธีการหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค ดังรูปภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงพฤติกรรมของวิธีการหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค
ที่มา (ธนฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

ระบบจะทำซ้ำจนค่าที่ได้เข้าสู่ค่าที่ดีที่สุดปัญหาซึ่งแต่ละ "อนุภาค" (Particle) ในฝูงทำหน้าที่เสมือนตัวแทนของชุดคำตอบ และจะมีการปรับค่าตำแหน่งและความเร็วในแต่ละรอบของการคำนวณโดยอิงจากประสบการณ์ของตนเอง (Personal Best) และตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูง (Global Best) โดยการเคลื่อนไหวของอนุภาคจะควบคุมโดยพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ inertia weight, cognitive coefficient และ social coefficient ซึ่งสามารถปรับจนได้เพื่อควบคุมพฤติกรรมการสำรวจ (exploration) และการรู้เข้าสู่ค่าที่ดีที่สุด (exploitation) ของระบบ จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า PSO ได้ถูกนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธามากมายรูปแบบ เช่น การวางแผนโลจิสติกส์ของโซ่ตังงาน การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในระบบยก (Kayhani et al., 2021) และการวางแผนเส้นทางในระบบขนส่ง (Otieno et al., 2024) อย่างไรก็ตาม ยังมีการศึกษาที่ประยุกต์ใช้ PSO ในการวางแผนการย้ายตำแหน่งของรถเครนแบบเคลื่อนที่โดยตรงน้อยมาก

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถกำหนดตำแหน่งจอดของรถเครนแบบเคลื่อนที่ในลักษณะที่เหมาะสมที่สุด โดยมีเป้าหมายเพื่อลดจำนวนการเคลื่อนย้าย ลดระยะเวลาในการติดตั้งวัสดุ และลดต้นทุนรวมของกระบวนการ โดยทดสอบผ่านข้อมูลจำลองจากโซ่ตังงานจริง และประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยกรณีศึกษาจำลอง

วัตถุประสงค์

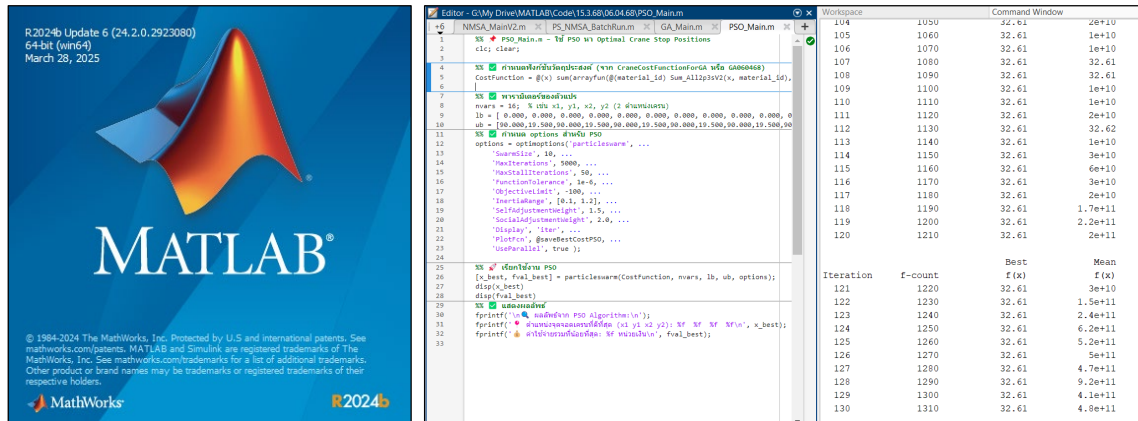
การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ

1. พัฒนาแบบจำลองการวางแผนเส้นทางของการย้ายตำแหน่งของรถเครนแบบเคลื่อนที่ในพื้นที่ก่อสร้าง โดยใช้ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)
2. ลดระยะเวลาและต้นทุนในการดำเนินงานของเครน ผ่านการหาตำแหน่งจอดที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของโซ่ตังงานจริง
3. ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองผ่านสถานการณ์จำลองจากกรณีศึกษาในงานก่อสร้างจริง เพื่อทดสอบความสามารถของ PSO ในการปรับใช้กับข้อมูลที่หลากหลาย

วิธีดำเนินการวิจัย

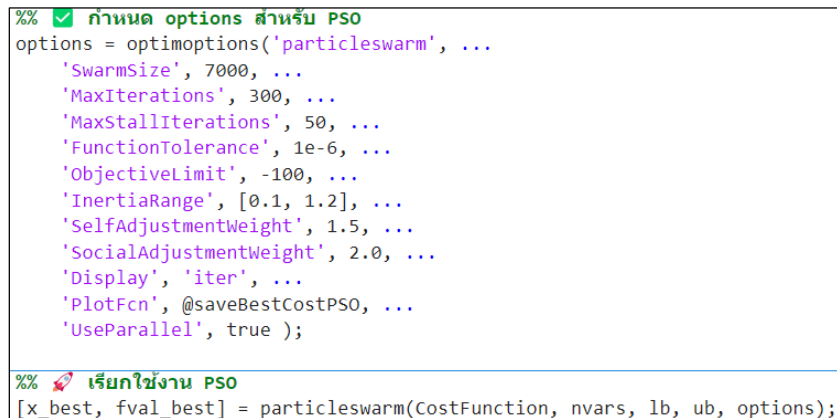
ในการดำเนินการวิจัย มีการใช้อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ในการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

1. MATLAB R2024b (MathWorks Inc.) ใช้สำหรับเขียนโค้ดของวิธีการหาคำตอบด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) และสมการคณิตศาสตร์ทั้งหมด ซึ่งโปรแกรมจะมีลักษณะดังรูปที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2024b
ที่มา (ธนฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

จากโปรแกรม MATLAB พบว่ามีฟังก์ชันหรือโค้ดสำเร็จรูปของวิธีการหาคำตอบแบบวิธีการหาคำตอบด้วยวิธีฝูงอนุภาคจึงสามารถเรียกใช้โดยผ่านคำสั่งและสามารถพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการหาคำตอบโดยมีการปรับพารามิเตอร์ในการหาจุดจุดจุดบนแบบเคลื่อนที่และจุดกองวัสดุที่เข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด ดังรูปภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงพารามิเตอร์ในการหาคำตอบของวิธีการหาคำตอบแบบฝูงอนุภาค
ที่มา (ธนฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

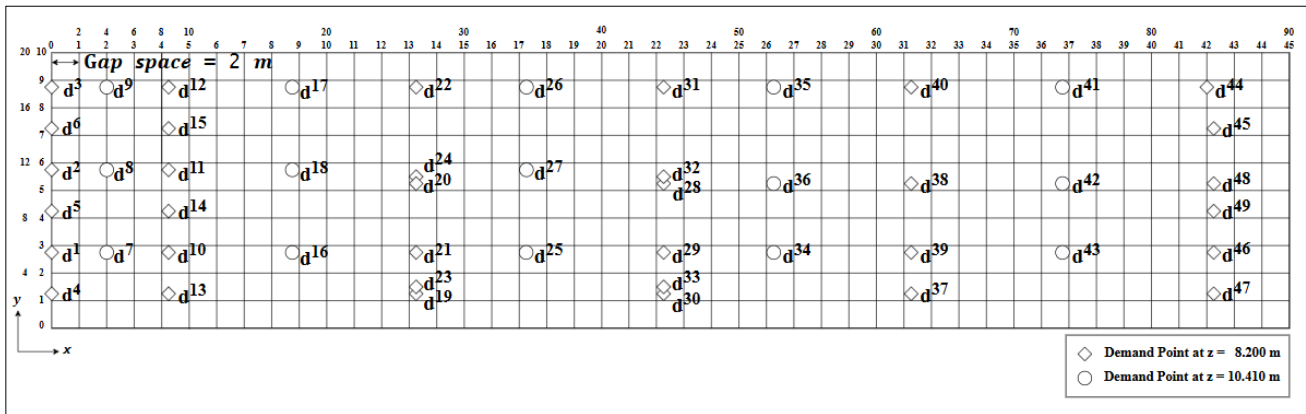
1. Microsoft Excel ใช้สำหรับรวบรวมข้อมูลจำลองจากกรณีศึกษา และจัดทำชุดข้อมูลอินพุตเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบ MATLAB รวมถึงใช้ฟังก์ชัน VBA (Visual Basic for Applications) ในการสร้างตารางควบคุม ตำแหน่งจุดติดตั้ง และจุดจุดจุดบนเบื้องต้น
2. Microsoft PowerPoint ใช้ในการสร้าง Flowchart, Diagram ของโครงสร้างโครโมโซม และขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาคำตอบในรูปแบบภาพประกอบเพื่อใช้ในการอธิบายภาคผนวกและงานนำเสนอ
3. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows 11 (64-bit) บนเครื่องประมวลผล Intel i9 พร้อม RAM ขนาด 32 GB เพื่อให้การประมวลผลชุดข้อมูลและการค้นหาคำตอบสามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

การเลือกใช้เครื่องมือช่างต้นมีความเหมาะสมกับลักษณะของงานวิจัยที่ต้องใช้ทั้งการคำนวณเชิงตัวเลข การสร้างแบบจำลอง และการแสดงผลอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นแพลตฟอร์มมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในวงการวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ซึ่งงานวิจัยนี้ดำเนินการผ่านกระบวนการ 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดแบบจำลองปัญหา (Model Formulation)

รวบรวมข้อมูลจำลองจากกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างโกดัง ซึ่งประกอบด้วย

- ตำแหน่งจุดติดตั้งวัสดุ อ้างอิงจากบทความของ Hozjan และ Klansek (2023) โดยมีตำแหน่งจุดติดตั้งวัสดุ 49 จุดโดยแต่ละจุดมีการระบุตำแหน่งแบบพิกัดในแนวแกน 3 มิติ ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงตำแหน่งจุดติดตั้งวัสดุ
ที่มา (ชนกฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

- ข้อจำกัดของเครน หรือ ลักษณะการเคลื่อนที่ของเครนแบบเคลื่อนที่ อ้างอิงจากบทความของ Hozjan และ Klansek (2023) โดยมีกรสร้างข้อจำกัดแบบ กำหนดองศาอิสระ (Degree of Freedoms) ของเครนแบบเคลื่อนที่ โดยสมการและตัวแปร 5 ชนิดได้แก่ มุมยกของบูมเครน (α_i) , มุมการหมุนของเครนแบบเคลื่อนที่ (θ_i) , ความยาวของบูม (l_{b_i}) , ระยะยกในแนวดิ่ง (z_{p_i}) และ ระยะทางที่เครนแบบเคลื่อนที่ที่ต้องเคลื่อนที่จากจุดจอดก่อนหน้านี้มายังจุดจอดปัจจุบัน (d_{m_i})
- สมการการหาระยะเวลาและต้นทุนการดำเนินการติดตั้ง และ ตัวกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องโดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

สมการหลักเริ่มจากการกำหนดระยะเวลาในการดำเนินงานทั้งหมดของเครนแบบเคลื่อนที่ ซึ่งแสดงในสมการที่ (3)

$$t = p * \sum_{i \in I} (t_p + t_{a_i} + t_{f_i} + t_{c_i}) \quad (3)$$

t คือเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานทั้งหมดของเครนแบบเคลื่อนที่(Total operating time) โดยประกอบด้วย p คือตัวเลขที่มีปริมาณมากที่สุดสอดคล้องกับสมการ t_p คือระยะเวลาในการเตรียมเครนแบบเคลื่อนที่ ก่อนการใช้งาน t_{a_i} คือระยะเวลาในการตรวจสอบและจัดตำแหน่งของชิ้นส่วนก่อนการติดตั้ง t_{f_i} คือระยะเวลาที่ใช้ในการติดตั้งชิ้นส่วนเข้ากับโครงสร้าง และ t_{c_i} คือระยะเวลาของรอบการติดตั้งชิ้นส่วนในแต่ละจุด ซึ่งแต่ละองค์ประกอบนี้มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพโดยรวมของโครงการ

ในสมการที่ (4) เวลาการเคลื่อนที่ของเครนในแต่ละจุดติดตั้ง t_{c_i} ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ t_{t_i} เวลาในการเคลื่อนย้ายของตัวเครน และ t_{w_i} เวลาในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ยกเครน เช่น บูม รอก และส่วนประกอบต่าง ๆ เป็นต้น

$$t_{c_i} = t_{t_i} + t_{w_i} \quad i \in I \quad (4)$$

$$t_{t_i} = \frac{d_{m_i}}{v_m} + t_s + t_d \quad i \in S \quad (5)$$

สมการที่ (5) กำหนดค่า t_{t_i} โดยคำนวณจาก d_{m_i} คือระยะทางที่เครื่องบินต้องเคลื่อนที่จากจุดจอดก่อนหน้ามายังจุดจอดปัจจุบันหารด้วย v_m คือความเร็วการเดินทางของเครื่องบิน พร้อมทั้งเพิ่มค่าคงที่ที่สะท้อนเวลาในการเริ่มและสิ้นสุดการเคลื่อนที่คือ t_s และ t_d

$$t_{w_i} = t_{l_i} + t_{r_i} + t_{u_i} + t_{e_i} \quad i \in I \quad (6)$$

สมการที่ (6) ระบุองค์ประกอบภายในของเวลา t_{w_i} ว่าประกอบด้วยเวลาการยี่ดบูม (t_{l_i}) เวลาในการหมุนเครื่องบินหรืออุปกรณ์ยก (t_{r_i}) เวลาการยกขึ้นลงของวัสดุ (t_{u_i}) และเวลาการติดตั้งวัสดุลงยังตำแหน่งที่ต้องการ (t_{e_i})

$$t_{r_i} = \max(t_{h_i}, t_{v_i}) + \gamma \min(t_{h_i}, t_{v_i}) \quad i \in I \quad (7)$$

สมการที่ (7) แสดงให้เห็นว่าการหมุนของบูมใช้เวลาเท่ากับค่าสูงสุดของเวลาการหมุนระหว่างแนวราบ (t_{h_i}) และแนวตั้ง (t_{v_i}) บวกกับค่าน้ำหนักของค่าต่ำสุดระหว่างสองค่าดังกล่าว โดยมีตัวกำหนดค่า γ เป็นตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อสะท้อนการทำงานร่วมกันของการเคลื่อนที่ในสองแกน

$$t_{h_i} = \max(t_{\rho_i}, t_{\theta_i}) + \beta \min(t_{\rho_i}, t_{\theta_i}) \quad i \in I \quad (8)$$

สมการที่ (8) ใช้สำหรับคำนวณ t_{h_i} ซึ่งเป็นเวลาการหมุนในแนวราบ โดยพิจารณาจากค่ามากที่สุดของเวลาในการทำงานของแขนเครื่องบิน (t_{ρ_i}) และเวลาการหมุนในแนวรัศมี (t_{θ_i}) พร้อมทั้งบวกค่าที่ได้จากการคูณค่าต่ำสุดของสองตัวแปรนี้กับตัวกำหนดค่า β เพื่อสะท้อนเวลาที่เกิดจากการหมุนร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ

$$t_{\rho_i} = t_{\alpha_i} + t_{\delta_i} \quad i \in I \quad (9)$$

$$t_{\alpha_i} = \frac{|\alpha_i - \alpha_{i-1}|}{v_\alpha} \quad i \in I \quad (10)$$

$$t_{\delta_i} = \frac{t_b |l_{b_i} - l_{b_{i-1}}|}{\delta} \quad i \in I \quad (11)$$

สมการที่ (9) ซึ่งกำหนดว่าเวลาในการเคลื่อนที่ของตัวแขนเครื่องบิน (t_{ρ_i}) เท่ากับผลรวมของเวลาในการปรับมุมบูม (t_{α_i}) และเวลาการเปลี่ยนความยาวบูม (t_{δ_i}) สมการที่ (10) ใช้คำนวณ t_{α_i} โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างของมุมบูมในรอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้า หารด้วยความเร็วเชิงมุมของการยกบูม (v_α) ส่วนในสมการที่ (11) เวลาการเปลี่ยนความยาวบูม (t_{δ_i}) จะถูกคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของบูมในแต่ละรอบเทียบกับค่าอัตราการยี่ดบูม (δ)

$$t_{\theta_i} = \frac{\theta_i}{v_\theta} \quad i \in I \quad (12)$$

$$t_{v_i} = \frac{|z_{v_i}|}{v_v} \quad i \in I \quad (13)$$

สมการที่ (12) และ (13) ใช้ในการคำนวณเวลาหมุนของเครนและเวลายกของในแนวดิ่งตามลำดับ โดย t_{θ_i} ในสมการที่ (12) ถูกคำนวณจากมุมหมุนของเครน (θ_i) หารด้วยความเร็วในการหมุนเครน (v_{θ}) ส่วน (t_{v_i}) ในสมการที่ (13) คือค่าที่ได้จากระยะยกในแนวดิ่ง (z_{v_i}) หารด้วยความเร็วในการยกแนวดิ่ง (v_v)

$$l_i = \sqrt{(x_{d_i} - x_{s_i})^2 + (y_{d_i} - y_{s_i})^2} \quad i \in I \quad (14)$$

$$l_{s_i} = \sqrt{(x_{s_i} - x_{c_j})^2 + (y_{s_i} - y_{c_j})^2} \quad i \in I \quad j \in J \quad (15)$$

$$l_{d_i} = \sqrt{(x_{d_i} - x_{c_j})^2 + (y_{d_i} - y_{c_j})^2} \quad i \in I \quad j \in J(i) \quad (16)$$

สมการที่ (14) กำหนดระยะทาง l_i ระหว่างจุดติดตั้งวัสดุกับจุดกองวัสดุ โดยใช้ระยะทางแบบยูคลิดจากพิกัด (x, y) ในขณะ
ที่สมการที่ (15) และ (16) ใช้สำหรับคำนวณระยะทางระหว่างจุดกองวัสดุกับจุดจอดรถเทรลเลอร์ l_{s_i} และจากจุดติดตั้งไปยังจุดจอดรถ
เครน l_{d_i} (ตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของเครนและเทรลเลอร์ในการจัดการวัสดุภายในไซต์งาน

$$z_{v_i} = z_{\alpha_i} + z_i \quad i \in I \quad (17)$$

$$z_{\alpha_i} = l_{b_i}(\sin \alpha_i - \sin \alpha_{i-1}) \quad i \in I \quad (18)$$

$$z_i = z_{d_i} - z_{s_i} \quad i \in I \quad (19)$$

สมการที่ (17) ใช้สำหรับคำนวณระยะยกในแนวดิ่ง (z_{v_i}) โดยคำนวณจากค่ารวมของตำแหน่งแนวดิ่งของวัสดุ (z_i) และ
ตำแหน่งแนวดิ่งของบูมเครนตามมุมยก (z_{α_i}) ส่วนสมการที่ (18) คือการคำนวณค่าของ z_{α_i} โดยใช้ความยาวของบูม (l_{b_i}) คูณกับค่า
ต่างของมุมยกในรอบปัจจุบันและรอบก่อนหน้า ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงความสูงที่เกิดจากการปรับมุมบูมและสมการที่ (19) ใช้
สำหรับคำนวณค่าความสูงแนวดิ่งของวัสดุ (z_i) ที่ต้องยกจากจุดกองวัสดุไปยังจุดติดตั้ง โดยระยะ z_i เป็นผลต่างระหว่างตำแหน่ง
แนวดิ่งของจุดติดตั้ง (z_{d_i}) และจุดกองวัสดุ (z_{s_i}) ซึ่งสะท้อนความสูงที่เครนต้องยกวัสดุในแนวดิ่ง

$$\alpha_i = \arccos \frac{l_{d_i}}{l_{b_i}} \quad i \in I \quad (20)$$

สมการที่ (20) ใช้คำนวณมุมยกของบูมเครน (α_i) ในแต่ละการติดตั้ง โดยใช้ฟังก์ชัน $\arccos$ ของอัตราส่วนระหว่าง
ระยะทางเชิงแนวราบจากจุดจอดเครนถึงจุดติดตั้ง (l_{d_i}) ต่อความยาวบูมเครนในรอบนั้น (l_{b_i}) ค่านี้จะสะท้อนว่ารถเครนแบบเคลื่อนที่
ต้องกางบูมในมุมเท่าใดเพื่อเข้าถึงตำแหน่งของจุดติดตั้งหรือจุดกองวัสดุ

$$\theta_i = \arccos \frac{l_{d_i}^2 + l_{s_i}^2 - l_i^2}{2l_{d_i}l_{s_i}} \quad i \in I \quad (21)$$

สมการที่ (21) คำนวณมุมการหมุนของรถเครนแบบเคลื่อนที่ในระนาบ X-Y โดยใช้กฎของโคไซน์ (law of cosines) เพื่อนำมาประเมินว่าต้องหมุนตัวเครนไปในมุมเท่าใดจึงจะสามารถเข้าถึงจุดติดตั้งวัสดุ ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดย l_{s_i} คือระยะห่างระหว่างจุดกองวัสดุกับจุดกองวัสดุ และ l_i คือระยะทางรวมที่เครนต้องเอื้อมไปยังวัสดุ สมการนี้มีประโยชน์ในการควบคุมการหมุนและรัศมีทำงานของบูมให้เป็นไปตามข้อกำหนดจริงของเครื่องจักร

$$d_m^{LO} \leq d_{m_i} \leq d_m^{UP} \quad (22)$$

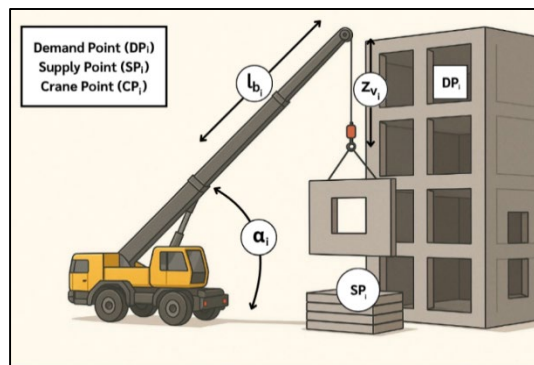
$$l_b^{LO} \leq l_{b_i} \leq l_b^{UP} \quad (23)$$

$$z_v^{LO} \leq z_{v_i} \leq z_v^{UP} \quad (24)$$

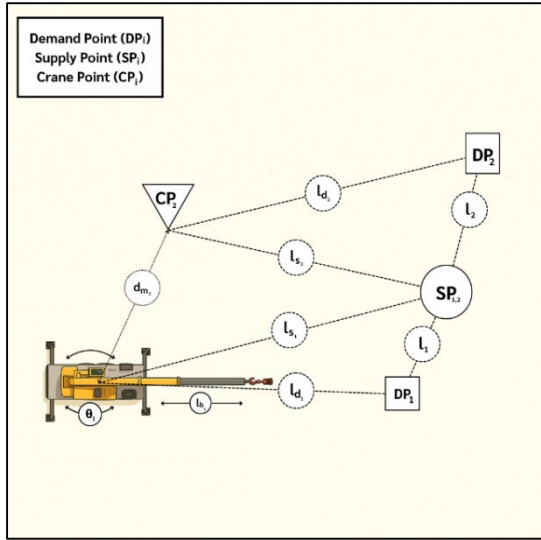
$$\alpha^{LO} \leq \alpha_i \leq \alpha^{UP} \quad (25)$$

$$\theta^{LO} \leq \theta_i \leq \theta^{UP} \quad (26)$$

สมการที่ (22) เป็นสมการที่ใช้ในการควบคุมขอบเขตของระดับอิสระในการเคลื่อนที่ของเครน (degree of freedom, *dof*) ให้อยู่ในช่วงที่อนุญาตเท่านั้น โดยจะต้องไม่ต่ำกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนดไว้ (dof^{LO}) และไม่เกินค่าสูงสุด (dof^{UP}) ซึ่งขอบเขตการทำงานของเครนสามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 6 และ 7



ภาพที่ 6 แสดงขอบเขตการทำงานของเครนแบบเคลื่อนที่ในมุมมองด้านข้าง
ที่มา (ธนกฤต ปิยะอมรกุล, 2568)



ภาพที่ 7 แสดงขอบเขตการทำงานของครนแบบเคลื่อนที่มุมมองด้านบน
ที่มา (ธนกฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งจุดที่ทำให้ค่าเวลารวมของการติดตั้งวัสดุน้อยที่สุด โดยเป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณค่าเป้าหมายที่ต้องการให้เกิดขึ้นสูงสุดหรือดีที่สุด (ในกรณีนี้คือ “ค่าที่น้อยที่สุด”) โดยในแบบจำลองนี้ ฟังก์ชันเป้าหมายคือ การลดต้นทุนรวมของการดำเนินงาน (Total Operating Cost) ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนจากการใช้งานเครื่องบินเชิงเวลา และต้นทุนเพิ่มเติมอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในการย้ายตำแหน่งและติดตั้งเครื่องบิน (27)

$$\text{Minimize } c = c_r t + c_e \quad (27)$$

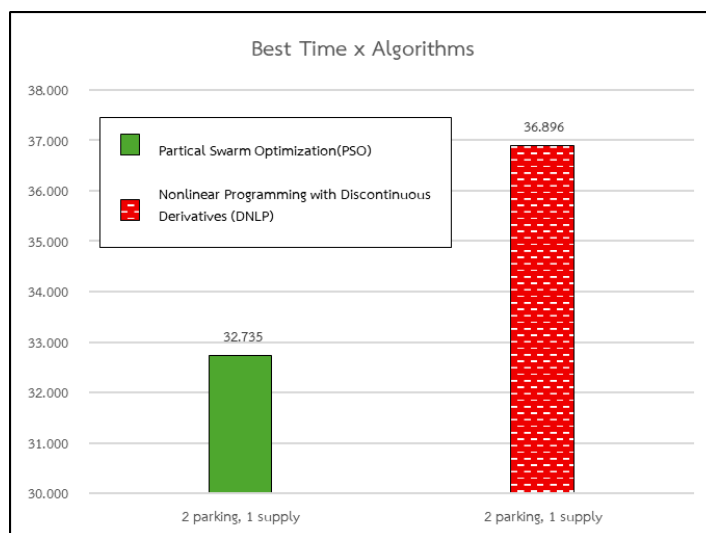
2. พัฒนาอัลกอริทึม PSO
 - ใช้โปรแกรม MATLAB R2024b ในการเขียนโค้ดขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค (PSO)
 - ให้อนุภาคค้นหาคำตอบภายใต้พื้นที่ที่ถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของไซต์งาน
 - เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างจำนวนของจุดจุดเคhrenแบบเคลื่อนที่และจุดกองวัสดุ
3. จำลองการทำงานและวิเคราะห์ข้อมูล
 - ใช้ Microsoft Excel เพื่อจัดเตรียมข้อมูล และเชื่อมโยงกับ MATLAB ในการรับผลลัพธ์จากการประมวลผล
 - วิเคราะห์ผลลัพธ์ ได้แก่ เวลารวมในการติดตั้ง การกระจายตำแหน่งจุด และจำนวนการเคลื่อนย้าย
4. ประเมินผลลัพธ์จากแบบจำลอง
 - ประเมินประสิทธิภาพของ PSO จากความสามารถในการลดระยะเวลาและจำนวนการเคลื่อนย้ายเครน
 - ตรวจสอบความยืดหยุ่นของโมเดลโดยเปลี่ยนข้อมูลจำลองในหลายกรณี
5. จัดทำข้อเสนอแนะแนวทางประยุกต์ใช้
 - วิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการต่อยอดแบบจำลองเป็นระบบช่วยตัดสินใจสำหรับวิศวกรในโครงการก่อสร้าง

ผลการวิจัย

การวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้แบบจำลองการย้ายตำแหน่งของรถเคาน์เตอร์แบบเคลื่อนที่ผ่านชั้นตอมอนวิฟูงอนูภาค (PSO) กับข้อมูลจำลองจากกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างโกดัง ผลการวิจัยสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้:

1. การพัฒนาแบบจำลองการวางแผนตำแหน่งรถเครนแบบเคลื่อนที่

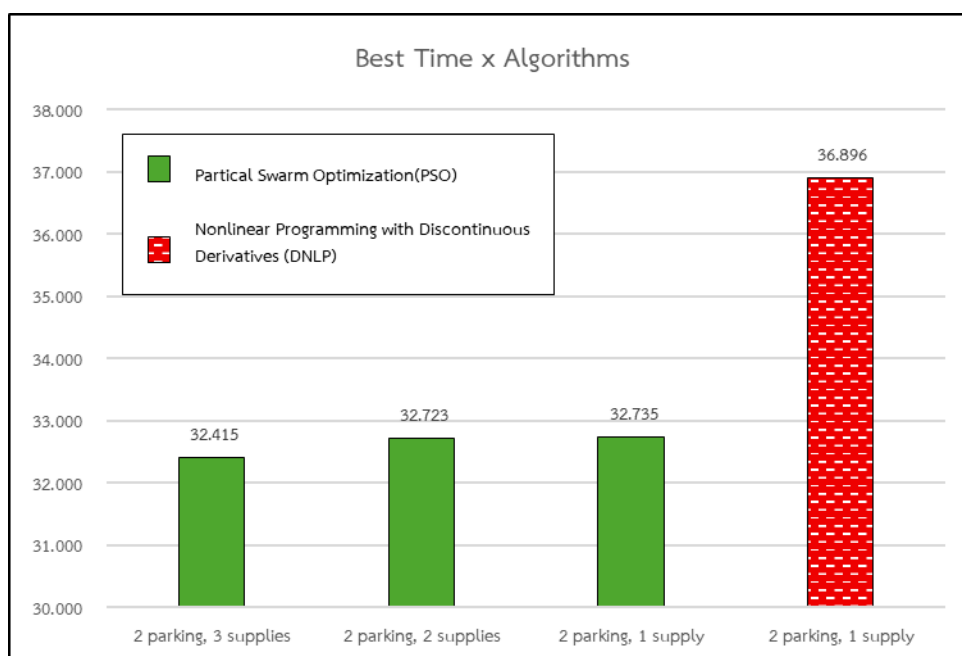
แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถประมวลผลตำแหน่งจอดที่เหมาะสมของรถเครนในพื้นที่ก่อสร้าง โดยพิจารณาข้อจำกัดด้านรัศมีการยก ระยะทาง มุมboom ความเร็วในการเคลื่อนที่ และเวลาในการติดตั้งวัสดุ แบบจำลองมีความยืดหยุ่นในการปรับใช้กับข้อมูลจำลองที่เปลี่ยนแปลงได้ จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของบทความที่อ้างอิงพบว่าในกรณีจุดจอดเครนแบบเคลื่อนที่ 2 จุดและจุดกองวัสดุ 1 จุด ด้วยวิธีการขั้นตอนวิธีฟองอากาศ (PSO) ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าบทความที่ใช้อ้างอิง ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีการหาคำตอบ
ที่มา (ธนฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

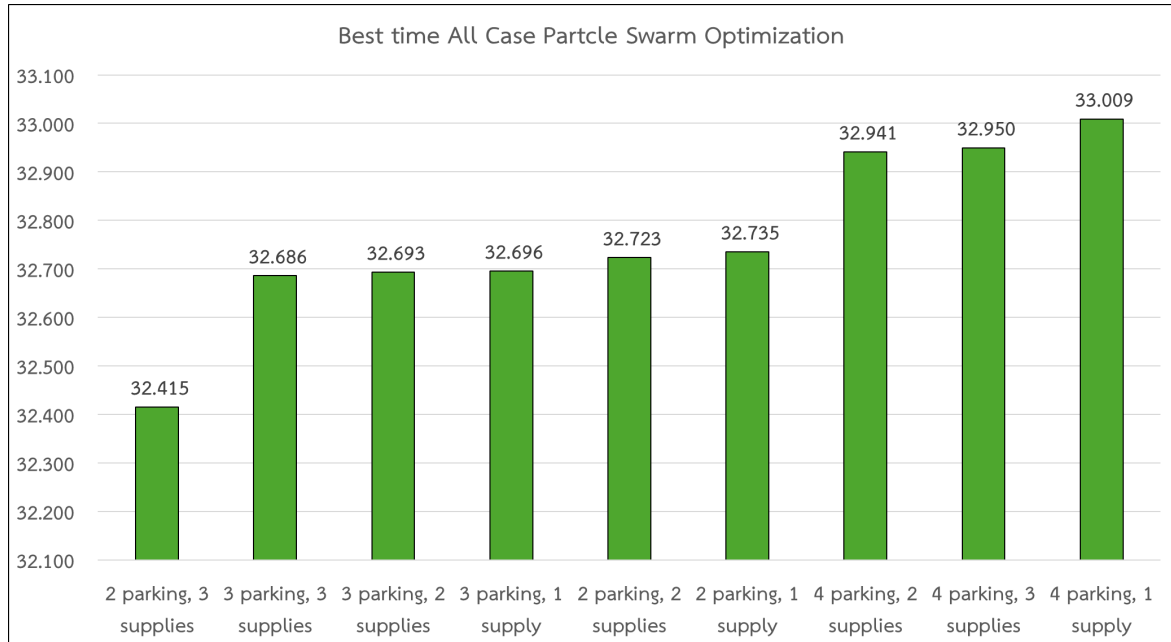
2. การลดระยะเวลาและต้นทุน

จากกราฟการเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีการหาคำตอบ หากเพิ่มจุดกองวัสดุอาจส่งผลให้สามารถลดระยะเวลาการทำงานของระบบเคลื่อนที่ได้ จึงทำการหาคำตอบและแสดงผลดังภาพที่ 9 ที่แสดงให้เห็นว่าหากเพิ่มจุดกองวัสดุทำให้ระยะเวลาการทำงานของระบบเคลื่อนที่ลดลงได้จริง



ภาพที่ 9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีการหาคำตอบและกรณีเพิ่มจุดกองวัสดุ
ที่มา (ธนฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

เมื่อวิเคราะห์กราฟกรณีเพิ่มจุดกองวัสดุ จึงตั้งสมมุติฐานว่าหากเพิ่มจุดจอดระบบเคลื่อนที่ให้มากขึ้นอาจทำให้เห็นแนวโน้มหรือตำแหน่งจุดจอดระบบเคลื่อนที่ที่สามารถทำให้ระยะเวลาการทำงานของระบบเคลื่อนที่ลดลงได้ จึงทำการประมวลผลและได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กราฟเปรียบเทียบกรณีเพิ่มจุดจอดเครื่องบินเคลื่อนที่และจุดกองวัสดุ
ที่มา (ธนกฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

จากการวิเคราะห์กราฟ กราฟเปรียบเทียบกรณีเพิ่มจุดจอดเครื่องบินเคลื่อนที่และจุดกองวัสดุทำให้เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่น้อยที่สุดจากทุกกรณีจะมีลักษณะจำนวนจุดจอดเครื่องบินที่น้อยที่สุดและมีจำนวนจุดกองวัสดุมากที่สุด และ ที่ระยะเวลาที่มากที่สุดจะมีลักษณะจำนวนจุดจอดเครื่องบินที่มากที่สุดและมีจำนวนจุดกองวัสดุน้อยที่สุด หมายความว่าเมื่อพิจารณาจำนวนจุดจอดเครื่องบินแบบเคลื่อนที่พบว่าที่จำนวนจุดจอดเครื่องบินที่น้อยจะมีค่าระยะเวลาการทำงานของเครื่องบินแบบเคลื่อนที่ที่น้อยลงด้วย หากเพิ่มจำนวนจุดจอดเครื่องบินแบบเคลื่อนที่ทำให้ระยะเวลาการทำงานของเครื่องบินแบบเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาจุดกองวัสดุพบว่า ยังมีจำนวนจุดกองวัสดุที่มากที่สุดจะทำให้ระยะเวลาการทำงานของเครื่องบินแบบเคลื่อนที่น้อยลง หากลดจุดกองวัสดุลงแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการทำงานของเครื่องบินแบบเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

เมื่อวิเคราะห์วิธีการหาคำตอบของทั้งสองวิธีการพบว่า เทคนิคการโปรแกรมเชิงไม่เชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง (DNLP) เป็นวิธีการหาคำตอบที่ละคำตอบและพัฒนาคำตอบทีละคำตอบ และคาดว่าจะใช้ระยะเวลาในการทำคำตอบค่อนข้างนานแต่ วิธีการหาคำตอบวิธีการขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค (PSO) นั้นเป็นวิธีการหาคำตอบแบบเป็นฝูงหรือละหลายคำตอบจึงมีโอกาสพบคำตอบที่มีค่าใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดได้ดีกว่าวิธีการเทคนิคการโปรแกรมเชิงไม่เชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง (DNLP) ในระยะเวลาที่เร็วกว่า

3. การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากข้อมูลจำลองในหลายกรณีพบว่า กรณีที่จำนวนจุดจอดเครื่องบินเคลื่อนที่ 4 จุด ระหว่างจุดกองวัสดุ 2 จุดกับ 3 จุด พบว่ากรณี 2 จุดกองมีค่าที่ดีกว่าจุดกองวัสดุ 3 จุดซึ่งจากการวิเคราะห์ที่จำนวนจุดกองวัสดุที่มากขึ้นควรมีระยะเวลาการทำงานที่ดีกว่า จากการพิจารณาที่จุดกองวัสดุ แต่เมื่อพิจารณาวิธีการหาคำตอบพบว่าเมื่อการหาคำตอบที่เข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุดนั้น จำเป็นต้องมีจำนวนอนุภาคที่มากเพื่อให้ค่าเริ่มต้นมีความหลากหลายและเข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุด แต่เมื่อเพิ่มค่าเริ่มต้นของจำนวนอนุภาคทำให้ระยะเวลาประมวลผลการหาคำตอบใช้เวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ในกรณีที่นำไปใช้ในการหาคำตอบในสถานการณ์จริงทำให้ระยะเวลาการประมวลผลอาจส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการดำเนินการก่อสร้างได้ และพฤติกรรมของการหาคำตอบของวิธีการขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค (PSO) คือการอาศัยการเคลื่อนที่ของจุดอนุภาคไปยังพื้นที่คำตอบของจุดต่าง ๆ ทำให้แสดงให้เห็นว่าเมื่อสุ่มค่าเริ่มต้นของอนุภาคเข้าใกล้จุดที่มีคำตอบที่เข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด (local optimum) ทำให้มีความเป็นไปได้ที่ฝูงอนุภาคมีวิ่งออกจากค่าที่ดีที่สุดได้จึงทำให้การหาคำตอบได้คำตอบที่เข้าใกล้จุดที่ดีที่สุด

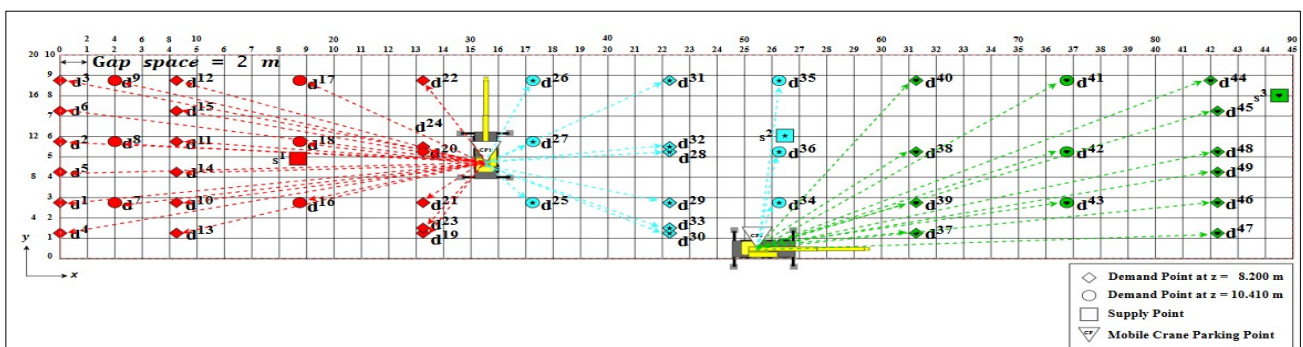
สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวางแผนเส้นทางการย้ายตำแหน่งของรถเครนแบบเคลื่อนที่ โดยใช้ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมเชิงเมตาฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของปัญหาที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ผลการศึกษพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณหาตำแหน่งจอดที่เหมาะสมได้อย่างแม่นยำภายใต้ข้อจำกัดของไซต์งาน โดยใช้ข้อมูลจำลองจากโครงการก่อสร้างโกดังซึ่งประกอบด้วยจุดติดตั้งวัสดุและจุดจอดเครนในลักษณะต่าง ๆ ผลการทดลองในหลายกรณีแสดงให้เห็นว่า PSO ให้ผลลัพธ์ที่เสถียรและมีแนวโน้มในการลดระยะเวลารวมของการติดตั้งวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาคำตอบอื่นที่อ้างอิงในวรรณกรรม เช่น DNLP (Discontinuous Nonlinear Programming) โดยในกรณีศึกษา 2 จุดจอด และ 1 จุดกองวัสดุ PSO ให้ค่าระยะเวลาที่ต่ำกว่า ซึ่งยืนยันถึงประสิทธิภาพของโมเดล นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มจำนวนจุดกองวัสดุส่งผลให้ระยะเวลาการทำงานของเครนลดลง ในขณะที่การเพิ่มจำนวนจุดจอดเครน อาจทำให้เกิดความซับซ้อนในการคำนวณและไม่จำเป็นต้องส่งผลดีเสมอไป แบบจำลองยังมีความสามารถในการปรับตัวตามเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงได้ เช่น เมื่อมีการเพิ่มจำนวนวัสดุหรือลดพื้นที่ใช้งาน นอกจากนี้ PSO ยังสามารถควบคุมจำนวน iteration ให้เหมาะสมกับข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากรในไซต์งาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจจริงในงานก่อสร้าง ผลการวิจัยยังสนับสนุนความสามารถของ PSO ในการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมภายในจำนวนรอบการประมวลผลที่จำกัด ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานภาคสนามที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและความรวดเร็วในการวางแผน

การอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ใช้วิธี PSO เปรียบเทียบกับข้อมูลจำลองหลายกรณี สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในปัญหาการวางแผนจุดจอดของรถเครน โดยเฉพาะในกรณีที่มีเงื่อนไขซับซ้อน เช่น จำนวนวัสดุหรือข้อจำกัดของไซต์งานที่หลากหลาย ผลลัพธ์ของ PSO มีความสม่ำเสมอและแสดงถึงความยืดหยุ่นในการใช้งาน เมื่อพิจารณาจากค่าระยะเวลารวมทั้งที่ได้จากกรณีจำลองต่าง ๆ จะพบว่าผลลัพธ์อยู่ในช่วงแคบ โดยไม่มีค่าผิดปกติหรือ outlier ที่สะท้อนถึงความล้มเหลวของอัลกอริทึม เมื่อเปรียบเทียบกับแนวทาง DNLP จากวรรณกรรม พบว่า PSO ไม่มีข้อจำกัดด้านอนุพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมาย และสามารถเข้าสู่คำตอบได้ดีในปัญหาที่ไม่ต่อเนื่องหรือมีภูมิประเทศการค้นหาคำตอบที่ซับซ้อน ยิ่งไปกว่านั้น การเพิ่มจำนวนจุดกองวัสดุช่วยให้ลดระยะเวลาการทำงานของเครนได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากลดระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนย้ายวัสดุ ในขณะที่การเพิ่มจำนวนจุดจอดเครนมากเกินไปกลับเพิ่มภาระในการคำนวณ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าความซับซ้อนของตัวแปรควรถูกควบคุมให้เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา แม้ว่า PSO จะมีข้อได้เปรียบหลายประการ แต่การเพิ่มจำนวนอนุภาคเพื่อเพิ่มความหลากหลายของค่าตั้งต้น อาจนำไปสู่เวลาในการประมวลผลที่มากขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาเมื่อใช้งานจริง โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่ต้องการผลลัพธ์แบบ Real-time หรือจำกัดทรัพยากรการประมวลผล

ประโยชน์หรือผลลัพธ์ที่ได้รับการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนเส้นทางการย้ายตำแหน่งของรถเครนแบบเคลื่อนที่ โดยใช้ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) พบว่าสิ่งที่ได้จากการดำเนินการวิจัยคือ พิกัดเชิง 3 มิติในพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในการระบุตำแหน่งจุดจอดเครนแบบเคลื่อนที่และจุดกองวัสดุที่มีระยะเวลาหรือคำตอบเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด โดยในกรณีที่ที่ดีที่สุดคือกรณี 2 จุดจอดเครนแบบเคลื่อนที่และ 3 จุดกองวัสดุจากกรณีศึกษา 9 กรณีซึ่งมีความแตกต่างในส่วนของการจำนวนของจุดจอดเครนแบบเคลื่อนที่และจุดกองวัสดุ โดยคำตอบที่ดีที่สุด จะนำพิกัดมาใช้ในการแสดงผล ซึ่งมีลักษณะดังรูปภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กราฟแสดงตำแหน่งจุดติดตั้งวัสดุและจุดกองวัสดุของวิธีการหาคำตอบด้วยวิธีฝูงอนุภาค
ที่มา (ธนกฤต ปิยะอมรกุล, 2568)

ส่วนการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้างนั้นคือการนำไปเป็นแบบโค้ดไปใช้ในการคำนวณที่เข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุด ในสถานการณ์จริงเนื่องจากตัวโค้ดสามารถหาคำตอบได้โดยระบุขนาดพื้นที่ จำนวนจุดจอดและจำนวนจุดติดตั้งวัสดุ ในการหาคำตอบ ในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งจะลดภาระการวิเคราะห์ของวิศวกรในการหาตำแหน่งจุดจอดแบบเคลื่อนที่ที่ใช้เวลาน้อย ในเชิงวิชาการ บทความสามารถนำไปต่อยอดหรือพัฒนาในเชิงวิธีการหาคำตอบที่เข้าใกล้ค่าตอบที่ดีที่สุด อาจเป็นการนำวิธีการหาคำตอบแบบอื่น ๆ ที่สามารถนำมาหาคำตอบที่เข้าใกล้ค่าตอบที่ดีที่สุดได้ยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัย พบข้อจำกัดและข้อสังเกตบางประการที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยในอนาคตได้ดังนี้:

1. ข้อจำกัดด้านข้อมูลพื้นที่ก่อสร้าง

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจำลองจากกรณีศึกษาเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุมลักษณะพื้นที่ก่อสร้างที่หลากหลาย เช่น งานก่อสร้างอาคารสูง หรือพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางเชิงซับซ้อน จึงควรขยายผลการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากหลายรูปแบบของโครงการก่อสร้าง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

2. ข้อจำกัดของโมเดลด้านเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง

แบบจำลองในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น สภาพแวดล้อม สภาพอากาศ หรือกิจกรรมอื่นในไซต์งานมาพิจารณา จึงแนะนำให้ศึกษาแบบจำลองที่มีลักษณะเป็น Time-dependent Optimization หรือใช้ข้อมูลแบบ Real-time เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสามารถในการใช้งานจริง

3. ข้อเสนอแนะด้านการประยุกต์ใช้งาน

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นโปรแกรมหรือแอปพลิเคชันเพื่อช่วยวางแผนการทำงานของวิศวกรในภาคสนามได้จริง จึงเสนอให้มีการพัฒนาเป็นเครื่องมือในรูปแบบ Web-based หรือ Mobile Application ที่สามารถเชื่อมโยงกับข้อมูล BIM หรือ GPS ในไซต์งาน เพื่อรองรับการตัดสินใจแบบ Real-time

4. ข้อเสนอแนะด้านการเปรียบเทียบอัลกอริทึม

แม้การวิจัยนี้จะเน้น PSO เป็นหลักโดยไม่เปรียบเทียบกับวิธีอื่น แต่ในอนาคตสามารถเพิ่มเติมการศึกษาเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น เช่น GA, SA, หรือ DNLP ในชุดข้อมูลเดียวกัน เพื่อประเมินจุดแข็ง-จุดอ่อนของแต่ละวิธีอย่างเป็นระบบ

เอกสารอ้างอิง

- Hozjan, M., & Klanšek, U. (2023). Optimal positioning of mobile cranes on construction sites using nonlinear programming with discontinuous derivatives. *Engineering Structures*, 277, 115564. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115564>
- Kayhani, A., Alvanchi, A., & Ardeshtir, A. (2021). Crane location planning using particle swarm optimization in construction sites. *Automation in Construction*, 123, 103511. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103511>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942–1948). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Otieno, M., Mutua, S. M., & Omondi, B. (2024). Application of particle swarm optimization in dynamic route planning for construction equipment. *Journal of Civil Engineering Research*, 14(2), 85–94.