

ขั้นตอนวิธีหึ่งห้อยแบบผสมผสานเพื่อลดต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้าให้น้อยที่สุด ในการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

วันฐณพงษ์ คงแก้ว¹ และ ศิวศิษย์ วิทยศิลป์^{2*}

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

Received: 7 April 2021; Revised: 21 April 2021; Accepted: 18 May 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่เป็นระบบการผลิตแบบอยู่กับที่ โดยแต่ละงานจะต้องผ่านขั้นตอนการผลิตจนแล้วเสร็จทุกขั้นตอน แต่อาจมีบางขั้นตอนการผลิตที่สามารถเกิดการหยุดชะงักได้ ถ้าหากเกินช่วงเวลาสำหรับการผลิตในแต่ละวัน โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีเมตาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อให้ได้ลำดับการผลิตที่มีต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้ามีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเป็นวิธีการที่ผสมผสานระหว่างวิธีฮิวริสติกส์แบบ NEH (Nawaz-Enscore-Ham Heuristic) ขั้นตอนวิธีแบบหึ่งห้อย และวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบใหม่ มีชื่อเรียกว่า “ขั้นตอนวิธีหึ่งห้อยแบบผสมผสาน (Hybrid Firefly Algorithm, HFA)” ในการทดสอบประสิทธิภาพของวิธี HFA จะดำเนินการกับปัญหาทดสอบจำนวน 10 ปัญหา และกรณีศึกษาจากอุตสาหกรรม 1 ปัญหา นอกจากนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีอื่นในปัจจุบันจำนวน 5 วิธี ภายในระยะเวลาประมวลผลที่จำกัด ผลการทดลองพบว่า วิธี HFA ที่นำเสนอเป็นวิธีที่มีความสามารถในการหาค่าที่ดีที่สุดที่สำหรับการแก้ปัญหาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป และในบางปัญหาสามารถค้นหาคำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากทุกวิธีได้ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น พบว่า วิธี HFA ให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีอื่นเกือบทุกวิธีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่าแบบผสมผสาน (Hybrid Cuckoo Search, HCS) ดังนั้น วิธี HFA จึงเป็นวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่มีประสิทธิภาพและสามารถแข่งขันได้สำหรับการแก้ปัญหาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

คำสำคัญ: ขั้นตอนวิธีหึ่งห้อย การจัดตาราง การผลิตคอนกรีตหล่อสำเร็จ ค่าใช้จ่ายรวมจากงานที่เสร็จล่าช้าและงานที่เสร็จก่อน

* Corresponding author. E-mail: sivasit.w@psu.ac.th

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Hybrid Firefly Algorithm to Minimize Total Cost of Earliness and Tardiness in Precast Production Scheduling

Wanatchapong Kongkaew¹ and Sivasit Wittayasilp^{2*}

Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

Received: 7 April 2021; Revised: 21 April 2021; Accepted: 18 May 2021

Abstract

This research studied the precast concrete production process in a stationary system. Each precast job was done through all production steps, but there may be interruptions in some production steps due to the available production time of the day. In this paper, a metaheuristic algorithm was developed to solve the precast production scheduling problem (PPSP) for a production sequence with a minimum total cost of earliness and tardiness penalties. This method combined the NEH heuristic of Nawaz, Enscore, and Ham, the firefly algorithm, and the new local search operations, called the hybrid firefly algorithm (HFA). To test the performance of the proposed HFA, the experiments were executed on 10 test problems and one real-world industrial case study with the runtime limits. The proposed HFA's performance was also compared to five recent methods. The results showed that the HFA has a good optimizing ability for solving the PPSP and it reached the best-known solutions among all considered algorithms. Moreover, comparing to others, the proposed HFA significantly outperformed almost all comparison algorithms, except the HCS (hybrid cuckoo search). Thus, the proposed HFA became an effective and competitive metaheuristic method for the considered PPSP.

Keywords: firefly algorithm, scheduling, precast production, total cost of tardiness and earliness

* Corresponding author. E-mail: sivasit.w@psu.ac.th

¹ Assistant Professor in Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

² Lecturer in Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

1. คำนำ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีแนวโน้มขยายตัวดีขึ้นและจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในอนาคตเนื่องจากที่ผ่านมาอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทยมีการใช้แรงงานจำนวนมาก แต่จากปัญหาขาดแคลนแรงงานก่อสร้างในช่วงหลัง ทำให้มีการนำเทคโนโลยีการก่อสร้างแบบใช้วัสดุสำเร็จรูปมาติดตั้ง (Precast Construction) เข้ามาใช้เป็นแนวทางจะช่วยแก้ปัญหาด้านการขาดแคลนแรงงาน โดยพบว่าในปี พ.ศ. 2563 มีการนำเทคโนโลยีข้างต้นมาใช้และส่งผลให้ต้นทุนรวมของโครงการก่อสร้างลดลง อีกทั้ง ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงปี พ.ศ. 2568 [1] จากแนวโน้มการใช้วัสดุสำเร็จรูปมาติดตั้งที่เพิ่มขึ้นข้างต้น ส่งผลให้ความต้องการในผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับอาคารที่พักอาศัยเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งถ้าบริษัทมีแผนการจัดตารางการผลิตผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปที่ดี จะสามารถส่งมอบได้ทันตามความต้องการของลูกค้าและไม่ผลิตเร็วเกินไป ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตลดลง เพิ่มกำไรให้บริษัท และสร้างความมั่นใจให้กับลูกค้า

การแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปนั้นมีการคิดค้นและพัฒนาวิธีการต่าง ๆ มากมาย เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) [2-6] วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาณานิคม (Ant Colony Optimization, ACO) [7] และในปีที่ผ่านมา [8] ได้นำเสนอวิธีการค้นหาคำตอบในย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน (Variable Neighborhood Search) และเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีอยู่สำหรับการการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อนได้แก่ ขั้นตอนวิธีแบบแบท (Bat Algorithm, BA) ขั้นตอนวิธีแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm, FA) และวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search, CS) ในงานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาวิธีเมตาฮิวริสติกส์บนพื้นฐานของวิธี FA ซึ่งเป็นวิธีการที่เลียนแบบพฤติกรรมของกระเปาะของหิ่งห้อยที่ใช้ในการหาคู่ครอง หาเหยื่อ [9] เนื่องจากเป็นวิธี FA ที่ง่ายและสามารถค้นหาคำตอบได้เป็นอย่างดี อีกทั้ง วิธี FA แสดงให้เห็นว่ามีศักยภาพเหนือกว่า GA ACO SA (Simulated Annealing) BA และ CS [8,10]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีเมตาฮิวริสติกส์บนพื้นฐานของวิธี FA ในการจัดตารางการผลิตผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อลดต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้าให้น้อยที่สุดโดยใช้ข้อมูลการผลิตจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและข้อมูลการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา ในการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่นำเสนอ รวมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีอื่นที่ได้มีการนำเสนอเพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปในปัจจุบัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

กระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นกระบวนการผลิตที่เป็นระบบการผลิตแบบอยู่กับที่ (Fixed Location Molds) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ [2-4, 8] ซึ่งพิจารณากระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปและประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอนคือ 1) การเตรียมและประกอบแม่แบบ (Mold Assembly and Preparing) 2) การตั้งค่าการเสริมแรง (Reinforcement Setting) 3) การเทคอนกรีต (Concrete Pouring) 4) การบ่มคอนกรีต (Concrete Curing) 5) การตัดออกจากแม่แบบ (Demolding) และ 6) การตกแต่งผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (Product Finishing) โดยที่แต่ละงานต้องผ่านขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ นั้นตามลำดับ โดยในขั้นตอนการผลิตที่ 1, 2, 3, 5 และ 6 จะใช้พนักงานและเครื่องมือเฉพาะ (Special Workforce and tools) ส่วนในขั้นตอนการผลิตที่ 4 นั้นไม่ต้องใช้ทรัพยากรใด ๆ แต่จะมีระยะเวลาในการผลิตไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์และสูตรการผลิตที่ใช้

นอกจากนี้ กระบวนการผลิตสามารถเกิดการหยุดชะงักอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ในบางกระบวนการ เมื่อพนักงานเลิกงานหลังเวลาทำงานปกติ นั่นคือ 8 ชั่วโมงต่อวัน และหากจำเป็นต้องมีการทำงานล่วงเวลา พนักงานจะต้องได้รับค่าจ้างในการทำงานล่วงเวลาภายในเวลาจำกัด (สมมติว่าไม่เกิน 4 ชั่วโมง) โดยในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปนี้ขั้นตอนที่สามารถขัดจังหวะ (Interruptible Operations) หรือสามารถหยุดชะงักได้ คือ การเตรียมและประกอบแม่แบบ การตั้งค่าการเสริมแรง การตัดออกจากแม่แบบ และ

การตกแต่งผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย และขั้นตอนที่ไม่สามารถขัดจังหวะ (Uninterruptible Operations) หรือหยุดชะงักไม่ได้ คือ การเทคอนกรีต และการบ่มคอนกรีต ซึ่งขั้นตอนที่สามารถขัดจังหวะได้ หากไม่สามารถทำงานให้เสร็จสิ้นภายในเวลาทำงานปกติ อาจหยุดชะงักและทำงานในส่วนที่ยังไม่แล้วเสร็จในวันถัดไปได้ ในขณะที่ขั้นตอนที่ไม่สามารถขัดจังหวะได้ จะต้องดำเนินการต่อไปจนกว่าจะทำงานนั้นเสร็จ และต้องทำในช่วงเวลาทำงานนอกเวลาปกติ (การทำงานล่วงเวลา)

สำหรับตัวแบบคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Production Scheduling Problem, PPSP) ตามสมมติฐานการผลิตข้างต้น ได้พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow Shop Scheduling Problem, FSSP) โดยการเพิ่มข้อจำกัดบางประการที่พบได้ในอุตสาหกรรม [2-4] ซึ่งงานวิจัยนี้จะพิจารณาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อให้ต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้าให้มีค่าน้อยที่สุด (Total Cost of Earliness and Tardiness) และมีคำอธิบายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในตัวแบบทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 1

สำหรับตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้ปรับตัวแบบจาก [4, 8] และใช้ตัวชี้วัดที่เกี่ยวกับต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้า โดยต้นทุนจากงานที่เสร็จล่าช้าเป็นต้นทุนที่สนับสนุนการจัดส่งผลิตภัณฑ์แบบทันเวลาพอดี (Just-in-time) ในขณะที่ต้นทุนงานที่เสร็จก่อนเป็นต้นทุนที่เกี่ยวกับการมีสินค้าคงคลัง (Inventory) ซึ่งต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้าสามารถคำนวณดังสมการที่ (1) และใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในตัวแบบ PPSP

$$f(x) = \left[\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \times \max(0, d_i - c_i) \right] + \left[\sum_{i=1}^n \tau_i \times \max(0, c_i - d_i) \right] \quad (1)$$

โดยมีสมการข้อจำกัด (Constraints) ดังนี้

ตารางที่ 1 คำอธิบายสัญลักษณ์คณิตศาสตร์

สัญลักษณ์	ความหมาย
n	จำนวนผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Precast Components, PCs) ทั้งหมด
m	จำนวนสถานีงาน (Workstations) ทั้งหมด
i	หมายเลขแทนผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (หรือเรียกว่า “งาน”)
j	หมายเลขแทนสถานีงาน (หรือเรียกว่า “เครื่องจักร” ในตัวแบบ FSSP)
t_{ij}	เวลาระบวนการของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป i th ในสถานีงาน j th
c_{ij}	เวลาเสร็จงานของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป i th ในสถานีงาน j th
d_i	กำหนดส่งมอบผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป i th
D	จำนวนวันทำงาน
ε_i	ค่าใช้จ่ายสินค้าคงคลังของผลิตภัณฑ์
τ_i	ค่าใช้จ่ายการจัดส่งล่าช้าของผลิตภัณฑ์
T	เวลาเสร็จงานสะสม
T_w	เวลาทำงานปกติใน 1 วันทำงาน (8 ชั่วโมง)
T_N	เวลาทำงานนอกเวลาปกติ
T_A	ช่วงเวลาการทำงานล่วงเวลาที่อนุญาต (สมมติ 1 วัน มีเท่ากับ 4 ชั่วโมง)

$$c_{ij} = \begin{cases} T & \text{if } T < 24D + T_w \\ T + T_N & \text{if } T \geq 24D + T_w \end{cases}, \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, 5, 6$

$$c_{ij} = \begin{cases} T & \text{if } T < 24D + T_w + T_A \\ 24(D+1) + t_{ij} & \text{if } T \geq 24D + T_w + T_A \end{cases}, \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, n; j = 3$

$$T^* = c_{i3} + t_{i4}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} T^* & \text{if } T^* > 24(D+1) \text{ or } T^* < 24D + T_w \\ 24(D+1) & \text{if } 24D + T_w \leq T^* \leq 24(D+1) \end{cases}, \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, n; j = 4$

$$T = \max(c_{(i-1)j}, c_{i(j-1)}) + t_{ij}, \quad i = 2, 3, \dots, n; \quad (6)$$

$$j = 2, 3, 4, 5, 6$$

$$D = \text{integer}(T/24) \quad (7)$$

ข้อจำกัดในสมการที่ (2) ใช้ในการคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของงานในขั้นตอนที่สามารถขัดจังหวะ สำหรับขั้นตอนที่ไม่สามารถขัดจังหวะได้ (การเทคอนกรีต และการบ่มคอนกรีต) จะต้องเลื่อนออกไปเป็นวันทำการถัดไป หากไม่สามารถดำเนินการให้เสร็จภายในชั่วโมงการทำงานหรือช่วงเวลาของการทำงานล่วงเวลาที่ยอมให้ได้ โดยการบ่มคอนกรีตเกิดขึ้นหลังจากการเทและไม่ต้องใช้แรงงาน เวลาเสร็จสิ้นของการเทคอนกรีตและการบ่มคอนกรีตสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (3) - (5) ตามลำดับ และเวลาเสร็จสิ้นสะสมและจำนวนวันทำงานจะคำนวณด้วยสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

2.2 ขั้นตอนวิธีหิ่งห้อย

ขั้นตอนวิธีหิ่งห้อย (Firefly Algorithm, FA) เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่ง ที่อาศัยแนวคิดที่ได้จากการฉายแสงทางธรรมชาติหรือการกระพริบแสงในจังหวะที่เร็วช้าแตกต่างกันของหิ่งห้อยที่ใช้ในการหาคู่ครอง หาเหยื่อ ซึ่งพัฒนาโดย Xin-She Yang โดยใช้หลักการเชิงอุดมคติ 3 ข้อ [9] ดังนี้

1) หิ่งห้อยทุกตัวจะไม่มีแบ่งเพศ (Unisex) จนกระทั่งหิ่งห้อยหนึ่งตัวจะถูกดึงดูดจากหิ่งห้อยตัวอื่น โดยไม่คำนึงถึงเพศ

2) ความน่าดึงดูด (Attractiveness) เป็นสัดส่วนกับแสงสว่าง ดังนั้น หิ่งห้อยที่มีแสงสว่างทุก ๆ สองตัวใด ๆ หิ่งห้อยตัวที่มีแสงสว่างน้อยกว่าจะเคลื่อนที่ไปหาตัวที่มีแสงสว่างมากกว่า ความน่าดึงดูดจะเป็นสัดส่วนกับความสว่าง และหิ่งห้อยทั้งสองจะลดแสงสว่างลงเมื่อระยะทางของทั้งคู่เพิ่มขึ้น ถ้าไม่มีหิ่งห้อยตัวใดมีแสงสว่างกว่า หิ่งห้อยจะเคลื่อนที่แบบสุ่ม

3) ความสว่าง (Brightness) ของหิ่งห้อยจะได้รับผลกระทบหรือกำหนดโดยลักษณะบริเวณพื้นที่ (Landscape) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective

Function) สำหรับปัญหาการหาค่าสูงสุด จะสามารถหาค่าความสว่างได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ขั้นตอนวิธีหิ่งห้อยมีกระบวนการทำงานตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เป็น การกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะใช้ในการหาคำตอบสำหรับปัญหาที่ต้องการหาคำตอบ ซึ่งแทนด้วย $f(\mathbf{x})$

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดค่าเริ่มต้น ได้แก่ การสร้างประชากรเริ่มต้น (Population Initialization) เป็นการสร้างประชากรเริ่มต้นให้กับหิ่งห้อย ($\mathbf{x}_i$) โดยการสุ่มค่าให้กับหิ่งห้อยแต่ละตัว ซึ่งหิ่งห้อยแต่ละตัวเป็นตัวแทนของผลลัพธ์ (Solution) ที่เป็นไปได้ 1 คำตอบ และจำนวนหิ่งห้อยจะถูกสุ่มสร้างขึ้นตามจำนวนของประชากร (N) ที่กำหนดไว้ การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสง (Light Absorption Coefficient) γ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดค่าความเข้มข้นของแสง (Light Intensity) เป็นขั้นตอนการกำหนดค่าความเข้มข้นแสง (I_i) ให้กับหิ่งห้อยตัวที่ i โดยใช้ค่า $f(\mathbf{x}_i)$ ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการตัดสินใจ ดังนั้น สำหรับปัญหา PPSP ในงานวิจัยนี้ จึงอนุมานได้ว่า ความเข้มข้นแสงของหิ่งห้อยแต่ละตัว คือ ต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้าที่เกิดจากการจัดตารางการผลิตแต่ละคำตอบนั่นเอง

ขั้นตอนที่ 4 การเคลื่อนที่ (Movement) เป็นขั้นตอนที่จะทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นแสงของหิ่งห้อย I_i กับค่าความเข้มข้นแสงของหิ่งห้อยตัวที่ j (I_j) ถ้าความเข้มข้นแสงของหิ่งห้อย I_i มากกว่าความเข้มข้นแสงของหิ่งห้อย I_j จะเคลื่อนที่หิ่งห้อยตัวที่ i ไปหาตัวที่ j แต่ถ้าน้อยกว่าจะไม่มีการเคลื่อนที่ ถ้าหากหิ่งห้อยมีค่าความเข้มข้นแสงเท่ากัน หิ่งห้อยจะทำการเคลื่อนที่แบบสุ่มโดยอาศัยหลักการของความน่าดึงดูดในการเคลื่อนที่ และในหิ่งห้อยแต่ละคู่ จะทำการปรับปรุงหิ่งห้อยตัวที่มีค่าความเข้มข้นแสงน้อยกว่าให้มีค่าความเข้มข้นแสงที่ดีขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) + \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (8)$$

เมื่อค่า $\beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)$ คือระยะทางของหิ้งห้อยตัวที่มีความเข้มแสงน้อยกับหิ้งห้อยตัวที่มีความเข้มแสงมาก ค่า $\beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}$ ได้จากการคำนวณค่าความน่าดึงดูดในช่วง $[0, 1]$ ในการปรับปรุงค่าความเข้มขึ้นให้กับหิ้งห้อยตัวที่แสงน้อยกว่านั้น ถ้าค่าความเข้มขึ้นแสงดีขึ้นสามารถนำหิ้งห้อยตัวนั้นไปใช้ได้เลย แต่ถ้าค่าความเข้มแสงยังไม่ดีขึ้น หิ้งห้อยตัวนั้นก็ยังคงเป็นตัวเดิมและมีค่าความเข้มแสงเท่าเดิม ค่า α เป็นค่าพารามิเตอร์การสุ่ม ค่า r_{ij} คือระยะทางระหว่างหิ้งห้อย i กับหิ้งห้อย j ค่า $rand$ เป็นค่าเลขสุ่มจากการแจกแจงเอกรูป (Uniform Distribution) ในช่วง $[0, 1]$ อย่างไรก็ตามในปัญหา PPSP นี้ เป็นการหาค่าต่ำสุด ดังนั้นจึงเปลี่ยนเงื่อนไขการเคลื่อนที่ไปเป็น ถ้าความเข้มขึ้นแสงของหิ้งห้อย I_i น้อยกว่าความเข้มขึ้นแสงของหิ้งห้อย I_j จะเคลื่อนที่หิ้งห้อยตัวที่ i ไปหาตัวที่ j แต่ถ้ามากกว่าจะไม่มีการเคลื่อนที่

ขั้นตอนที่ 5 การหาค่าความน่าดึงดูดของหิ้งห้อย (Attractiveness) ซึ่งก็คือความสว่างของหิ้งห้อย i บนหิ้งห้อย j นั้น ที่ขึ้นอยู่กับระดับความสว่างของหิ้งห้อย i และระยะทาง r_{ij} ระหว่างหิ้งห้อย i กับหิ้งห้อย j นอกจากระยะทางที่ทำให้ค่าความน่าดึงดูดเปลี่ยนแปลงไป ยังมีกรณีที่แสงสว่างถูกดูดซับที่เปลี่ยนแปลงค่าความน่าดึงดูดได้เช่นกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสง γ ซึ่งค่าความน่าดึงดูดของหิ้งห้อยเป็นสัดส่วนของความเข้มขึ้นแสงที่มองเห็นได้โดยหิ้งห้อยข้างเคียง ซึ่งสามารถหาความน่าดึงดูด (β) ของหิ้งห้อย ได้ดังนี้

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (9)$$

เมื่อ β_0 เป็นความน่าดึงดูดสูงสุด ซึ่ง β_0 สามารถแทนความน่าดึงดูดที่ $r = 0$

ขั้นตอนที่ 6 การประเมินคำตอบใหม่และปรับปรุงค่าความเข้มขึ้นของแสง (Evaluation New Solution and Update Light Intensity) เป็นขั้นตอนการถอดรหัสของหิ้งห้อยแต่ละตัวที่ผ่านขั้นตอนที่ 3 – 5 และคำนวณหาความเหมาะสมตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาหรือค่าความเข้มขึ้นแสงของหิ้งห้อย เมื่อได้ทำงานครบทุกตัว

เรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการเรียงลำดับ (Rank) หิ้งห้อยตามค่าความเข้มขึ้นแสงจากน้อยไปมาก (ในกรณีเป็นปัญหาหาค่าต่ำสุด) และหาหิ้งห้อยตัวที่ดีที่สุด ณ ปัจจุบันรอบนั้น ๆ (Current Best) สุดท้าย ขั้นตอนวิธีหิ้งห้อยจะหยุดการทำงานก็ต่อเมื่อมีการวนซ้ำจนครบทุกรอบของการค้นหาคำตอบหรือหยุดด้วยเงื่อนไขอื่นตามที่ได้กำหนดไว้ และสรุปคำตอบพร้อมกับแสดงผลลัพธ์ของหิ้งห้อยตัวที่ดีที่สุดออกมา

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป ส่วนใหญ่มักใช้วิธีการเรียงจัดเรียงลำดับของงานที่ดี เพื่อไม่ให้งานเกิดการรอคอยทรัพยากรและมีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรมากที่สุด โดย [5] ได้ศึกษาการจัดเรียงลำดับของงานในกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่เป็นสายการผลิตแบบผสม (Mixed Production Line) เพื่อให้ทรัพยากรมีการใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด และใช้วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ในการแก้ปัญหา และในช่วงปีเดียวกัน [2-3] ได้ใช้วิธี GA ในการแก้ปัญหการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เวลาแล้วเสร็จงาน (Makespan) หรือเวลาล่าช้าโดยรวม (Total Tardiness) มีค่าน้อยที่สุด ต่อมา [6] ศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มจำนวนแม่แบบและการเปลี่ยนแปลงไปของเวลาที่ใช้ในการผลิต (Production Time) ที่ส่งผลต่อเวลาการไหลของงานทั้งหมด (Total Flowtime) เวลาว่างงานของเครื่องจักร (Total Machine Idle Time) และเวลาที่เกิดจากงานเสร็จก่อนและงานเสร็จล่าช้าโดยรวม (Total Tardiness and Earliness) หลังจากนั้น [4] ได้นำเสนอการแก้ปัญหการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการพิจารณาขนาด ลินค้ำในกระบวนการที่จำกัด (Limited Buffer Size) ระหว่างสถานีงานแบบหลายวัตถุประสงค์และแก้ปัญหาด้วยวิธี GA ต่อมา [11-12] ได้ศึกษาการจัดตารางการผลิตสำหรับคอนกรีตสำเร็จรูปในลักษณะที่มีหลายแม่แบบที่อยู่กับที่และขนานกัน (Identical Parallel Fixed Location Molds) และมีการพิจารณาการเลือกสูตรการผลิตในตัวเอง นอกจากนี้ [13] ได้มีการปรับปรุงตัวแบบปัญหาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปให้ครอบคลุมโซ่อุปทานการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปทั้งหมด และในปีที่ผ่านมา [8] ได้ประยุกต์วิธีการค้นหาคำตอบในย่านใกล้เคียงแบบแปรผันเมื่อมีหลาย

วัตถุประสงค์ (Multi-objective Variable Neighborhood Search, MOVNS) และ NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) สำหรับการแก้ปัญหาการผลิตรคอนกรีตสำเร็จรูปแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยมีการเปรียบเทียบกับวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ใหม่ ๆ ที่ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหา FSSP แล้ว ได้แก่ ขั้นตอนวิธีแบบแบท (Bat Algorithm), ขั้นตอนวิธีแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) วิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search) และพบว่าวิธี MOVNS มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธี NSGA-II และดีกว่าวิธีอื่นที่ใช้ในการเปรียบเทียบเกือบทุกวิธี

3. ขั้นตอนวิธีหิ่งห้อยแบบผสมผสานสำหรับการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

ในหัวข้อนี้จะอธิบายขั้นตอนวิธีหิ่งห้อยแบบผสมผสาน (Hybrid Firefly Algorithm, HFA) ที่นำเสนอสำหรับการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป โดยเป็นการผสมผสานระหว่างวิธีการสร้างคำตอบเบื้องต้นแบบ NEH (Nawaz-Enscore-Ham heuristic) [14] ขั้นตอนวิธีหิ่งห้อย (Firefly Algorithm, FA) และการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบใหม่ (New Local Search) ดังต่อไปนี้

3.1 การแทนรูปแบบคำตอบ

การแทนรูปแบบคำตอบเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่สุดในการออกแบบวิธี HFA โดยพื้นที่ของคำตอบประกอบด้วยงานหรือผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปจำนวน n งาน เวกเตอร์ $\mathbf{x}_i^t = [\mathbf{x}_1^t, \mathbf{x}_2^t, \dots, \mathbf{x}_n^t]$ เป็นค่าตำแหน่งของหิ่งห้อยในพื้นที่คำตอบ ในการเข้ารหัสคำตอบจะใช้ค่าเลขสุ่มจำนวนจริง แล้วจะนำค่าเหล่านี้ไปเรียงลำดับเลขดัชนีเพื่อถอดรหัสของคำตอบ โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเรียงค่าตำแหน่งจากมากไปหาน้อย (Largest-Ranked-Value, LRV) ในการหาลำดับงาน [15] นั่นคือ ลำดับผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปที่ต้องเข้ากระบวนการผลิต

3.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น

การสร้างประชากรเริ่มต้นจะแบ่งประชากรหิ่งห้อยออกเป็น 2 ส่วน ประชากรหิ่งห้อยส่วนแรกจะสร้างลำดับงานด้วยวิธี NEH และคิดเป็นจำนวน 10% [15] ของประชากร

ทั้งหมด ส่วนประชากรที่เหลือจะทำการสร้างโดยการใช้วิธีการสุ่ม ซึ่งหิ่งห้อย 1 ตัว จะแทนค่าคำตอบของปัญหา 1 คำตอบ เปรียบเสมือนตารางการผลิต 1 ตาราง สำหรับประชากรหิ่งห้อยส่วนแรก (ลำดับงาน) ที่สร้างด้วยวิธี NEH จะถูกแปลงให้เป็นค่าตำแหน่งของหิ่งห้อยแต่ละตัวสำหรับการค้นหาด้วยวิธี FA ซึ่งการแปลงจะดำเนินการโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$x_{NEH,j} = x_{\max,j} - \frac{(x_{\max,j} - x_{\min,j})}{n} \cdot (Seq_{NEH,j} - 1), \quad (10)$$

เมื่อ $x_{NEH,j}$ คือ ค่าตำแหน่งของหิ่งห้อยในตำแหน่ง j th ของเวกเตอร์ ดัชนี $j = 1, 2, \dots, n$ คือ ตำแหน่งในลำดับงาน และ $Seq_{NEH,j}$ คือ ดัชนีของงานในตำแหน่ง j th ของลำดับงาน สำหรับประชากรอื่นที่เหลือ สร้างอย่างสุ่มจากสมการ

$$x_{i,j} = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) * rand, \quad (11)$$

เมื่อ $rand$ คือ ค่าเลขสุ่มจากการแจกแจงเอกรูป (Uniform Distribution) ในช่วง $[0, 1]$ ค่า $x_{\max} = 1$ และค่า $x_{\min} = -1$

3.3 การค้นหาคำตอบด้วยวิธีหิ่งห้อย

ในขั้นตอนวิธีหิ่งห้อยแบบผสมผสานสำหรับการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปนี้ จะผสมผสานขั้นตอนวิธีหิ่งห้อยที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการกระพริบแสงของหิ่งห้อย ร่วมกับการสร้างประชากรเริ่มต้นจาก 2 วิธี คือ ประชากรบางส่วนสร้างจากวิธี NEH และประชากรส่วนที่เหลือสร้างขึ้นมาอย่างสุ่ม ดังอธิบายในหัวข้อ 3.2 และนำประชากรเริ่มต้นไปใช้ในขั้นตอนวิธีหิ่งห้อย ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ ที่ 2.2

3.4 การค้นหาคำตอบเฉพาะที่

เมื่อได้คำตอบจากขั้นตอนวิธีหิ่งห้อยแล้ว เพื่อให้มีการค้นหาคำตอบในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบใหม่

(New Local Search, NLS) ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบรวดเร็ว (Fast Local Search) [16, 17] เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีกว่าภายในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน ในการปรับปรุงความหลากหลายของประชากรและปรับปรุงคุณภาพของคำตอบ จะใช้การสร้างคำตอบในพื้นที่ใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน 4 วิธีคือ การแลกเปลี่ยน (Swap) การแทรก (Insert) การพลิกกลับด้านภายในคำตอบ (Inverse) และการค้นหาแบบเดินสุ่ม (Random Walk)

การค้นหาคำตอบด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยน จะสุ่มเลือกสองตำแหน่งจากลำดับงาน แล้วทำการสลับงานในสองตำแหน่งนั้น เทคนิคการแทรก จะสุ่มเลือกสองตำแหน่งจากลำดับงาน และนำงานที่อยู่ในตำแหน่งจากการสุ่มในครั้งที่สอง ไปแทรกไว้ก่อนงานที่อยู่ในตำแหน่งจากการสุ่มในครั้งแรก เทคนิคการพลิกกลับด้านภายในคำตอบ จะพลิกกลับด้านของกกลุ่มตำแหน่งบางส่วนในลำดับงาน เทคนิคการค้นหาแบบเดินสุ่ม จะเป็นเทคนิคเดียวกันกับที่ใช้ในการค้นหาจริงใหม่ของนกกาเหว่าในวิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่า [15-17] โดยจะสุ่มก้าวเดิน (Step) เพื่อค้นหาคำตอบใหม่ และจะยอมรับคำตอบใหม่ถ้าหากมีค่าความน่าจะเป็นมากกว่าความน่าจะเป็นในการค้นพบคำตอบที่แย่กว่า (Probability of Discovery of Worse Solution, p_d) ทั้งนี้ จากการใช้เทคนิคการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ทั้ง 4 แบบ จะทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในท้องถิ่น (Local Optimal Point) ได้

การค้นหาคำตอบด้วยวิธี NLS จะเริ่มจากการเลือกเทคนิคการค้นหาคำตอบเฉพาะที่มาครั้งละ 1 วิธี เพื่อดำเนินการกับคำตอบเริ่มต้น โดยการพยายามสร้างคำตอบชุดใหม่ที่อยู่ภายในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง ถ้าคำตอบใหม่มีต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้าน้อยกว่าหรือเท่ากับต้นทุนรวมๆ ของคำตอบปัจจุบัน จะยอมรับคำตอบชุดใหม่ และดำเนินการค้นหาต่อไปด้วยเทคนิคการค้นหาแบบเดิม แต่ถ้าคำตอบใหม่ด้อยกว่า จะเปลี่ยนไปใช้เทคนิคการค้นหาลำดับถัดไป ซึ่งจะดำเนินการค้นหาคำตอบด้วยวิธี NLS และยอมรับคำตอบที่ดีกว่าจนกระทั่งเป็นไปตามเกณฑ์การหยุดการค้นหา วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบ

ใหม่ที่ใช้ในการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปนี้ แสดงดังรูปที่ 1

Procedure New Local Search (NLS)

Begin

$\mathbf{x}$ is the individual to be enhanced.

Apply the LRV rule to convert the individual $\mathbf{x}$ to the job permutation π .

Evaluate the objective function $f(\pi)$.

for $k = 1$ to $n \times (n-1)$

$h = 1$;

while $h \leq 4$

if $h = 1$

Randomly select two different positions u and v ;

Execute swap operation for the individual $\mathbf{x}$, and obtain the individual $\mathbf{x}'$;

Elseif $h = 2$

Randomly select two different positions u and v ;

Execute insert operation for the individual $\mathbf{x}$, and obtain the individual $\mathbf{x}'$;

Elseif $h = 3$

Randomly select two different positions u and v ;

Execute Inverse operation for the individual $\mathbf{x}$, and obtain the individual $\mathbf{x}'$;

Elseif $h = 4$

Execute random walk operation for the individual $\mathbf{x}$ and obtain the individual $\mathbf{x}'$;

End if.

Apply the LRV rule to convert the individual $\mathbf{x}'$ to the job permutation π' .

Evaluate the objective function $f(\pi')$.

if ($f(\pi') - f(\pi) \leq 0$)

$\mathbf{x} = \mathbf{x}'$; $f(\pi) = f(\pi')$; $\pi = \pi'$; *Continue*

Else $h = h + 1$;

End if.

End while.

End for.

End.

รูปที่ 1 รหัสเทียมของวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบใหม่

สำหรับรหัสเทียมของขั้นตอนวิธีหึ่งห้อยแบบผสมผสานที่นำเสนอ สำหรับการ จัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 2

Algorithm Hybrid Firefly Algorithm (HFA) for PPSP

Initialization:

Generate initial population of fireflies $\mathbf{x}_i$ ($i = 1, \dots, NP$):
10% vectors by NEH heuristics and the rest of vectors
with random vector values.

Apply the LRV rule to convert the individual $\mathbf{x}_i =$
($x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}$) to the job permutation π_i .

Assume that $f(\pi_i)$ is the objective function of π_i .

Light intensity I_i at $\mathbf{x}_i$ is determined by $f(\mathbf{x}_i)$.

Define light absorption coefficient γ .

while ($t < MaxGen$)

for $i = 1$ to n // all NP fireflies //

for $j = 1$ to n // all NP fireflies //

if ($I_j > I_i$)

Move firefly i toward j in n -dimension;

End

Attractiveness varies with distance r via $\exp(-\gamma r)$

Evaluate new solutions and update light intensity.

End for j

End for i

Rank the fireflies and find the current best.

Apply the new local search operation.

End while

Postprocess results and visualization

รูปที่ 2 รหัสเทียมของขั้นตอนวิธีหึ่งห้อยแบบผสมผสาน
สำหรับการ จัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

4. การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีหึ่งห้อยแบบผสมผสานหรือ HFA ที่นำเสนอ ในการค้นหา
คำตอบปัญหาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป
(Precast Production Scheduling Problem, PPSP)
รวมถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบกับ
วิธี MOPPSM [4] และวิธีเมตาฮิวริสติกส์บางวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่

ซับซ้อนและมีการนำไปใช้เพื่อแก้ปัญหา PPSP ในปัจจุบัน
ได้แก่ วิธีค้นหาคำตอบในย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน
(Variable Neighborhood Search, VNS) [8] วิธีการค้นหา
แบบนกกาเหว่าแบบผสมผสาน (Hybrid Cuckoo Search,
HCS) [8, 15] วิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่าแบบใหม่ (New
Cuckoo Search, NCS) [17] และขั้นตอนวิธีหึ่งห้อยแบบไม่
ต่อเนื่อง (Discrete Firefly Algorithm, DFA) [10]

ในการทดลองสำหรับทุกวิธี ได้มีการเขียนชุดคำสั่ง
(Code) บนโปรแกรม MATLAB และดำเนินการทดลองบน
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีโปรเซสเซอร์ Intel® Core™ i5
ความเร็วจะอยู่ที่ 3.30 GHz และหน่วยความจำ 4GB ซึ่งทำ
การทดลองแต่ละวิธีโดยการค้นหาคำตอบของปัญหาทดสอบ
หรือรันโปรแกรมกับปัญหาทดสอบเป็นจำนวน 10 ครั้ง และ
หาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ (ต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและ
งานที่เสร็จล่าช้า) ในแต่ละวิธี แล้วนำผลลัพธ์จากแต่ละวิธีมา
เปรียบเทียบกับกัน นอกจากนี้ ยังได้นำการวิเคราะห์ทางสถิติมา
ใช้เป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์ผลลัพธ์จากแต่ละวิธีเช่นกัน

4.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดสอบความสามารถของอัลกอริทึมหรือ
ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ จะดำเนินการโดยใช้ชุดปัญหาทดสอบ 2
ประเภท คือ ปัญหาชุดแรกเป็นกรณีศึกษาปัญหาการจัด
ตารางการผลิตในอุตสาหกรรมจริงซึ่งเป็นข้อมูลการผลิตของ
บริษัทผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง ส่วน
ปัญหาชุดที่สองเป็นข้อมูลการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป
(Precast Components, PCs) จำนวน 26 ประเภท ที่
รวบรวมจากวรรณกรรมก่อนหน้า [3, 6, 13] และนำมาสร้าง
ขึ้นเป็นปัญหาทดสอบจำนวน 10 ปัญหา ที่มีจำนวน
ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปหรืองานที่ต้องผลิตที่มีจำนวน
แตกต่างกันตั้งแต่ 10 งาน จนถึง 100 งาน ทั้งนี้ สามารถ
สืบค้นข้อมูลการผลิตของปัญหาการจัดตารางการผลิตคอนกรีต
สำเร็จรูปทั้ง 11 ปัญหาทดสอบได้จาก [8]

4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการ
ทดลองของวิธี HFA เป็นดังนี้คือ ขนาดประชากร $NP = 50$
ค่าพารามิเตอร์การสุ่ม $\alpha = 1$ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสง
 $\gamma = 0.5$ ความน่าดึงดูดสูงสุดของหึ่งห้อย $\beta_0 = 1$ สำหรับ

วิธีอื่นที่นำมาใช้เปรียบเทียบจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ระบุไว้ในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องแต่ละวิธี ซึ่งสามารถดูค่าพารามิเตอร์ของแต่ละวิธีได้ใน [4, 8, 17] นอกจากนี้ ในแต่ละครั้งของการรันโปรแกรมเพื่อค้นหาคำตอบของแต่ละปัญหาทดสอบได้มีการจำกัดเวลาประมวลผลที่ใช้ในการรันโปรแกรม (CPU Time Limit) เป็นเกณฑ์การหยุดการทำงานของวิธีการค้นหาคำตอบสำหรับแต่ละปัญหา

4.3 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการทดลอง

สำหรับตัวชี้วัดในการทดลองของทุกวิธีคือ ค่าเฉลี่ยต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้า ถ้าวิธีการใดให้ค่าเฉลี่ยดังกล่าวน้อยที่สุด วิธีนั้นก็จะมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหานั้น ๆ นอกจากนี้ ยังได้นำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการทดสอบ Paired-Sample t-Test มาใช้เป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์ผลลัพธ์จากแต่ละวิธี [8] เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของวิธี HFA ที่เหนือกว่าวิธีอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ โดยการทดสอบทางสถิติจะมีสมมติฐานหลัก (H_0) ที่ว่า ไม่มีความแตกต่างกันในผลลัพธ์ของ 2 วิธีใด ๆ ที่นำมาทดสอบ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

สำหรับพจน์ของ “คู่ของ (A, B)” ในการทดสอบด้วย Paired-Sample t-Test หมายความว่า การทดสอบสมมติฐานทางสถิติได้ทำการทดสอบบนคู่ของวิธี A และวิธี B เพื่อที่จะตัดสินว่า วิธี A ให้ค่าเฉลี่ยตัวอย่างดีกว่าวิธี B หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงว่าวิธี A ให้ค่าเฉลี่ยตัวอย่างดีกว่าวิธี B อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 กล่าวคือ วิธี A มีความสามารถในการค้นหาคำตอบดีกว่าวิธี B อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5. ผลการดำเนินงาน

จากการทดสอบความสามารถของวิธี HFA ที่นำเสนอ กับปัญหาทดสอบทั้ง 11 ปัญหา พบว่า วิธี HFA สามารถค้นหาคำตอบ (ค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้า) ได้ดีกว่าวิธี DFA, NCS, VNS และ MOPPSM อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้วิธี HFA สามารถ

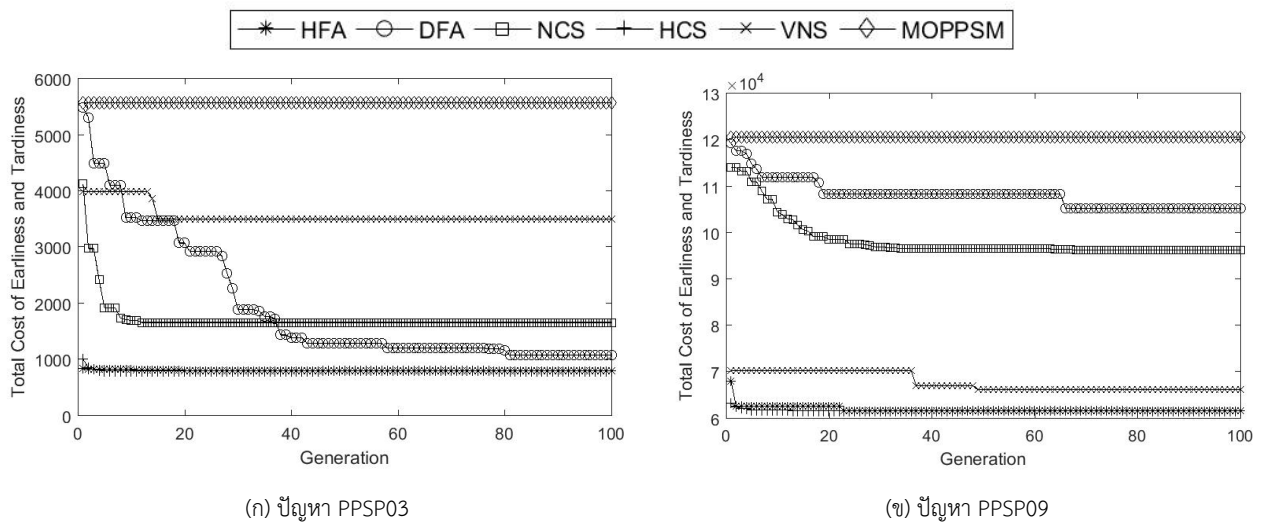
ค้นหาคำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้เป็นจำนวน 8 ปัญหา (จากทั้งหมด 11 ปัญหา) ได้แก่ PPSP01 PPSP02 PPSP03 PPSP04 PPSP05 PPSP06 PPSP07 และปัญหากรณีศึกษา ในขณะที่วิธี HCS สามารถค้นหาคำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากทุกวิธี ได้เพียง 5 ปัญหา ซึ่งวิธี HFA มีความสามารถที่เหนือกว่าวิธี HCS ในด้านของจำนวนปัญหาที่สามารถค้นหาคำตอบได้ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้า น้อยที่สุดจากทั้ง 11 ปัญหา พบว่า วิธี HFA ให้ค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมฯ เป็นอันดับที่ 2 ในขณะที่วิธี HCS ให้ค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมฯ อันดับที่ 1 โดยมีค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมฯ แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหา PPSP03 และ PPSP09 จะเห็นว่า วิธี HFA มีแนวโน้มเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาเร็วกว่าวิธี DFA, NCS, VNS และ MOPPSM แต่จะเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาช้ากว่าวิธี HCS เพียงเล็กน้อย ซึ่งวิธี HFA สามารถเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดอย่างรวดเร็วภายในการค้นหา 30 รอบ (Generation) แรก เช่นเดียวกับวิธี HCS ดังแสดงในรูปที่ 3

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้า น้อยที่สุดที่ได้ในแต่ละวิธีมีค่าไม่แตกต่างกันมาก (ดังในตารางที่ 2) โดยเฉพาะวิธี HFA และวิธี HCS เพื่อเป็นการยืนยันผลลัพธ์ว่า วิธี HFA มีความสามารถในการค้นหาคำตอบเหนือกว่าวิธีใดบ้าง นั่นคือ มีค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้า น้อยที่สุดที่มีค่าน้อยกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ จะทดสอบโดยอาศัยการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ และมีสมมติฐานหลักดังอธิบายในหัวข้อ 4.3 จากตารางที่ 3 พบว่า ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 เกือบทุกคู่ ยกเว้น คู่ของ (HFA, HCS) นั่นคือ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วิธี HFA มีความสามารถในการค้นหาคำตอบได้ดีกว่าวิธี DFA, NCS, VNS และ MOPPSM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่วิธี HFA และวิธี HCS มีความสามารถในการค้นหาคำตอบที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้าที่สุดจากการรัน 10 รอบ ในแต่ละวิธีการ

ปัญหาทดสอบ	ขนาดปัญหา (งาน)	เวลาที่จำกัดไว้ (วินาที)	คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากทุกวิธี	วิธีการที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ					
				HFA	DFA	NCS	HCS	VNS	MOPPSM
PPSP01	10	15	1299.70	1299.70	1299.94	1299.72	1299.70	1314.69	1390.00
PPSP02	20	70	1375.67	1375.67	1452.92	1622.93	1385.50	2032.25	2354.24
PPSP03	30	120	805.50	805.50	1094.97	1671.96	808.98	4319.06	5131.35
PPSP04	40	300	2778.96	2778.96	4159.69	5305.33	2808.19	10869.86	5131.35
PPSP05	50	600	7566.69	7566.69	10376.60	13038.12	7633.87	23208.81	26096.24
PPSP06	60	600	17301.27	17301.27	21745.49	24266.67	17436.53	37448.02	39980.34
PPSP07	70	600	36445.94	36445.94	44501.41	49601.88	36459.78	69118.27	72206.67
PPSP08	80	600	48555.55	48589.30	62075.38	66236.48	48555.55	89133.25	93170.28
PPSP09	90	600	61687.24	61778.70	82025.74	86532.47	61687.24	115796.88	118577.97
PPSP10	100	600	121713.68	122213.27	152904.14	159274.19	121713.68	196669.13	200182.97
กรณีศึกษา	24	70	5910.45	5910.45	5927.16	5949.11	5910.45	6732.14	7141.79
ค่าเฉลี่ย				27824.13	35233.04	37708.99	27790.86	50603.85	51942.11



รูปที่ 3 พฤติกรรมการค้นหาคำตอบของทุกวิธีในปัญหา PPSP03 และ PPSP09

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสถิติของทุกวิธีด้วย Paired-sample t-test

คู่ของวิธีการที่ใช้ในการทดสอบ	ค่า P-value
คู่ของ (HFA, DFA)	0.036
คู่ของ (HFA, NCS)	0.023
คู่ของ (HFA, HCS)	0.518
คู่ของ (HFA, VNS)	0.013
คู่ของ (HFA, MOPPSM)	0.013

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแก้ปัญหาในภาพรวม จะเห็นว่า วิธี HFA ประสบความสำเร็จในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาได้มากกว่าวิธี HCS และวิธีอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ ดังนั้น วิธี HFA จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าวิธีอื่นที่นำมาเปรียบเทียบในการแก้ปัญหา PPSP ข้างต้น และมีความสามารถในการค้นหาคำตอบที่สามารถแข่งขันได้

6. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาวิธีเมตาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Production Scheduling Problem, PPSP) เพื่อให้ได้ลำดับการผลิตที่มีต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้ามีค่าน้อยที่สุด โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีเมตาฮิวริสติกส์แบบผสมผสานระหว่างวิธีฮิวริสติกส์แบบ NEH ขั้นตอนวิธีแบบหึ่งห้อย และวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบใหม่ และเรียกว่า “Hybrid Firefly Algorithm (HFA)” เพื่อแก้ปัญหา PPSP ที่เป็นปัญหาทดสอบ จำนวน 11 ปัญหา ซึ่งมีขนาดปัญหาสูงสุด 100 งาน นอกจากนี้ ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธี HFA กับวิธีอื่น ได้แก่ DFA, NCS, HCS, VNS และ MOPPSM เป็นต้น ภายในระยะเวลาประมวลผลที่จำกัดตามขนาดของปัญหา ผลการทดลองพบว่า วิธี HFA สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาที่ได้จากทุกวิธี (Best Known Solutions) ได้มากที่สุดเป็นอันดับที่ 1 และค้นหาได้เป็นจำนวน 8 ปัญหา และเป็นวิธีที่ให้ค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้ามีค่าน้อยที่สุดจากทุกปัญหาทดสอบใกล้เคียงกับวิธี HCS นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบโดยอาศัยหลักการทางสถิติ พบว่า วิธี HFA มี

ต้นทุนรวมจากงานที่เสร็จก่อนและงานที่เสร็จล่าช้ามีค่าน้อยที่สุดต่ำกว่าวิธี DFA, NCS, VNS และ MOPPSM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ไม่พบความแตกต่างของผลลัพธ์เมื่อเทียบกับวิธี HCS อีกทั้ง วิธี HFA สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เป็นอย่างดี ดังนั้น วิธี HFA เป็นวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหา PPSP และมีความสามารถในการค้นหาคำตอบที่สามารถแข่งขันได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชุติมา มุสิกะเจริญ, “ศูนย์วิจัยกสิกรไทยมองการก่อสร้างด้วย Pre-cast ตอบโจทย์ปัญหาขาดแคลนแรงงาน” [Online]. แหล่งที่มา: www.efinancethai.com/LastestNews/LatestNewsMain.aspx?release=y&ref=M&id=amc5eGQ2ZllyMTg9. [วันที่เข้าถึง 20 ก.พ. 2564].
- [2] W. T. Chan and H. Hu, “An application of genetic algorithms to precast production scheduling,” *Computers and Structures*, vol. 79, no. 17, pp. 1605–1616, 2001.
- [3] W. T. Chan and H. Hu, “Production scheduling for precast plants using a flow shop sequencing model,” *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 165–174, 2002.
- [4] C. H. Ko and S. Wang, “Precast production scheduling using multi-objective genetic algorithms,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 7, pp. 8293–8302, 2011.
- [5] S. S. Leu and S. T. Hwang, “GA-based resource-constrained flow-shop scheduling model for mixed precast production,” *Automation in Construction*, vol. 11, pp. 439–452, 2002.
- [6] V. Benjaoran, N. N. Dawood, and B. Hobbs, “Flow shop scheduling model for bespoke precast concrete production planning,”

- Construction Management and Economics.*, vol. 23, no. 1, pp. 93-105, 2005.
- [7] Q. Liang and H. Hu, "Optimization of Precast Production Scheduling for Rail Track Slab," in *Proceedings of the 2017 IEEE Technology and Engineering Management Conference*, USA, 2017.
- [8] Z. Lehuang and W. Kongkaew, "A multi-objective variable neighborhood search algorithm for precast production scheduling," *Engineering Journal.*, vol. 24, no. 6, pp. 139-157, 2020.
- [9] X. S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Frome: Luniver Press, 2008.
- [10] M. K. Marichelvam, T. Prabakaran, and X. S. Yang, "A discrete firefly algorithm for the multi-objective hybrid flowshop scheduling problems," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation.*, vol. 18, no. 2, pp. 301-305, 2014.
- [11] N. Suranpitak and W. Tharmmaphornphilas, "Formula selection and scheduling for precast concrete with double layer production," *Engineering and Applied Science Research.*, vol. 39, no. 2, pp. 181-193, 2012.
- [12] W. Tharmmaphornphilas and N. Sareinpithak, "Formula selection and scheduling for precast concrete production," *International Journal of Production Research.*, vol. 51, no. 17, pp. 5195-5209, 2013.
- [13] Z. Wang and H. Hu, "Improved precast production-scheduling model considering the whole supply chain," *Journal of Computing in Civil Engineering.*, vol. 31, no. 4, pp. 1-12, 2017.
- [14] M. Nawaz, E. E. Ensore, I. Ham, "A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem," *Omega.*, vol. 11, no. 1, pp. 91-95, 1983.
- [15] X. Li and M. Yin, "A hybrid cuckoo search via Lévy flights for the permutation flow shop scheduling problem," *International Journal of Production Research.*, vol. 51, no. 16, pp. 4732-4754, 2013.
- [16] P. Guo, W. Cheng, and Y. Wang, "Parallel machine scheduling with step-deteriorating jobs and setup times by a hybrid discrete cuckoo search algorithm," *Engineering Optimization.*, vol. 47, no. 11, pp. 1564-1585, 2015.
- [17] H. Wang, W. Wang, H. Sun, Z. Cui, S. Rahnamayan, and S. Zeng, "A new cuckoo search algorithm with hybrid strategies for flow shop scheduling problems," *Soft Computing.*, vol. 21, pp. 4297-4307, 2017.