

ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแมลงหวี่สำหรับการออกแบบคานลึกลูกคอนกรีตเสริมเหล็ก
The efficiency of fruit fly optimization algorithm for design of
reinforced concrete deep beams

สุชิน ไชยแสงราช และ อัศนัย ทาณา*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: assanai.ta@rmu.ac.th

Received 17 January 2025; Received in revised form 17 March 2025; Accepted 4 April 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแมลงหวี่ในการออกแบบคานลึกลูกคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบที่มีความประหยัดสูงสุด อัลกอริทึมแมลงหวี่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Microsoft Visual Studio และทดสอบออกแบบกับตัวอย่างคานลึกจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยมีการกำหนดค่าจำนวนแมลงหวี่ไว้ตั้งแต่ 100 ถึง 500 ตัว และจำนวนการทำซ้ำตั้งแต่ 50 ถึง 500 ครั้ง ผลการทดลองพบว่า จำนวนแมลงหวี่และจำนวนการทำซ้ำมีผลกระทบโดยตรงต่อการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมแมลงหวี่ ยิ่งกว่านั้น การเลือกใช้จำนวนแมลงหวี่ตั้งแต่ 400 ตัวและจำนวนการทำซ้ำตั้งแต่ 350 ครั้งขึ้นไปจะส่งผลให้ได้รับราคาเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ดีกว่าค่าอื่น นอกจากนี้ ผลการออกแบบที่เหมาะสมยังมีความประหยัดมากกว่าวิธีการออกแบบอื่นที่นำมาเปรียบเทียบโดยเฉลี่ยร้อยละ 8

คำสำคัญ: อัลกอริทึมแมลงหวี่, การออกแบบที่เหมาะสม, การออกแบบคานลึกลูกคอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

This research presents the performance of the fruit fly optimization algorithm for designing reinforced concrete deep beams. The objective of this research is to design the most economical deep beams. The fruit fly optimization algorithm was generated using Microsoft Visual Studio and tested using three deep-beam samples. The number of fruit flies was set between 100 and 500 and the number of iterations ranged from 50 to 500. The experimental results showed that the number of fruit flies and the number of iterations directly affected the ability of the algorithm to find optimal solutions. Moreover, selecting at least 400 fruit flies and at least 350 iterations resulted in a better average cost and standard deviation than the other parameters. In addition, the optimal design results were, on average, 8 % more economical than the other design methods used for comparison.

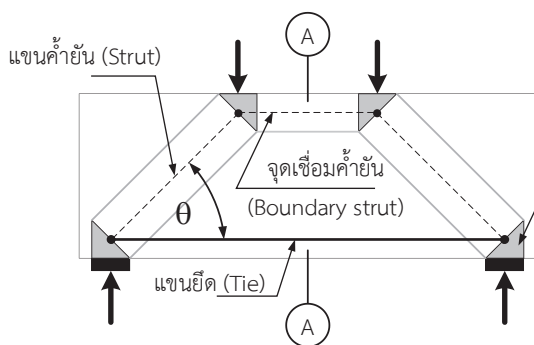
Keywords: Fruit fly optimization algorithm, optimum design, reinforced concrete deep beam.

บทนำ

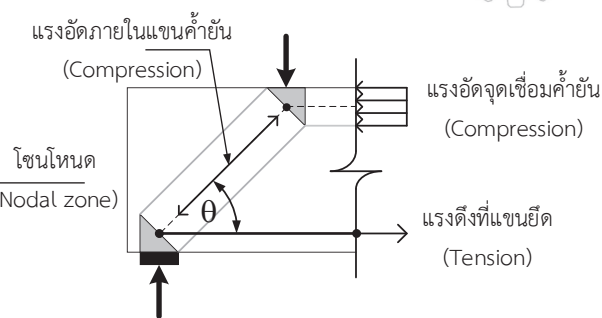
คานลึกลึคคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete deep beam) เป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงในพื้นที่จำกัด เช่น อาคารสูง สะพาน และโครงสร้างพิเศษที่ต้องการความแข็งแรงและความปลอดภัยสูง ในมาตรฐาน ACI318-19 (American Concrete Institute) ปี ค.ศ. 2019 [1] ได้นิยามคานลึกลึคไว้ว่าเป็นโครงสร้างที่แรงกระทำด้านหนึ่งส่งผ่านไปยังจุดรองรับอีกด้านหนึ่งโดยเกิดแรงอัดในรูปแบบของค้ำยัน (Strut) ระหว่างจุดรับแรงและจุดรองรับ คานลึกลึคจะต้องมีคุณสมบัติตรงตามเงื่อนไขต่อไปนี้ 1) ระยะห่างระหว่างจุดรองรับต้องไม่เกิน 4 เท่าของความลึกของคาน 2) จุดที่รับแรงกระทำแบบจุด (Concentrated loads) ต้องอยู่ภายในระยะ 2 เท่าของความลึกคานเมื่อวัดจากจุดรองรับ ในการออกแบบคานลึกลึคต้องพิจารณาการกระจายของความเครียดตามความลึกของคานที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear strain distribution) ซึ่ง ACI318-19 ได้กำหนดแบบจำลองแกนค้ำยันและแกนยึด (Strut and tie model) เพื่อใช้ในการออกแบบคานลึกลึค รูปที่ 1 แสดงแนวคิดแบบจำลองแกนค้ำยันและแกนยึดของคานลึกลึคคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยในรูปที่ 1(ก) แสดงพฤติกรรมของแรงภายในคานลึกลึค ซึ่งมีเส้นอัดรองรับแรงอัดและเส้นดึง (Tie) รองรับแรงดึง ส่วนรูปที่ 1(ข) แสดงการกระจายแรงภายในคาน โดยมีแรงอัด (Compression) ที่ตำแหน่งของค้ำยันและจุดเชื่อมค้ำยัน และแรงดึง (Tension) ที่ตำแหน่งแกนยึด บริเวณแกนค้ำยันต้องออกแบบเพื่อรับแรงเฉือนและบริเวณแกนยึดต้องออกแบบเพื่อรับแรงดึงหรือโมเมนต์ดัด

ในส่วนของพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานลึกลึคคอนกรีตเสริมเหล็ก Adhikary และคณะ [2] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกลึคคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบไดนามิก (Dynamic loading conditions) พบว่า ความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในปริมาณสูงสามารถป้องกันการวิบัติแบบร่นแรงได้ นอกจากนี้ ยังมีการสร้างสมการสำหรับทำนายอัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของคาน ซึ่งสมการเหล่านี้สามารถใช้ในการประมาณกำลังรับแรงเฉือนได้อย่างแม่นยำ Kareim และคณะ [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมและความแข็งแรงของคานลึกลึคที่มีช่องเปิดในส่วนตัดขวาง โดยเฉพาะคานที่มีส่วนตัดขวางแบบมีปีก (flanged section) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปีกของคานมีผลต่อความแข็งแรง ซึ่งต้องพิจารณาในการออกแบบทุกครั้ง และพบว่าทฤษฎีสถานะแรงอัดดัดแปลง (Modified compression field theory, MCFT) ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด Nassif และคณะ [4] ได้ศึกษาทั้งการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขเกี่ยวกับพฤติกรรมการดัดของคานลึกลึคคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่งโพลีเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (Glass fiber reinforced polymers, GFRP) โดยใช้คอนกรีตความแข็งแรงสูง (High strength concrete, HSC) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความกว้างของรอยแตกและการโก่งตัวที่กลางคานลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อัตราส่วนการเสริมแรง GFRP ที่ 1.2 μ b เมื่อเทียบกับคานที่เสริมด้วยเหล็กเสริมปกติ สามารถช่วยลดการโก่งตัวของคานลงถึงร้อยละ 20 - 39 และจากงานวิจัยของ Ibrahim และคณะ [5] ได้นำเสนอสูตรสำหรับการคำนวณความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานลึกลึค จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของ NLFE (Non-linear finite element analysis) ว่ามีความใกล้เคียงกับความสามารถในการรับน้ำหนักของคานที่ทดสอบและได้รับการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับโปรแกรม ABAQUS ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นความแม่นยำของแบบจำลองการวิเคราะห์ในการแสดงพฤติกรรมของคานลึกลึคทั้งแบบทึบและแบบมีช่องเปิด รวมไปถึงการทำนายน้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวและรูปแบบของรอยแตกร้าว



(ก) แบบจำลองแกนค้ำยันและแกนยึด



(ข) แผนผังอิสระบริเวณ A - A (Free body diagram)

รูปที่ 1 แบบจำลองแกนค้ำยันและแกนยึดในคานลิก

การประเมินความถูกต้องของผลการออกแบบ และกำลังรับน้ำหนักของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปนิยมใช้มาตรฐาน ACI 318-19 [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในระดับสากล โดยมาตรฐานนี้ได้กำหนดแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัย ความทนทาน และประสิทธิภาพของโครงสร้าง ถึงแม้ว่ามาตรฐาน ACI 318 จะได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก แต่การนำไปปรับใช้ในบางพื้นที่อาจมีข้อจำกัด เนื่องจากปัจจัยด้านสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ และข้อกำหนดเฉพาะของหน่วยงานกำกับดูแลในแต่ละท้องถิ่น ทำให้ในการออกแบบภายในประเทศไทยยังคงมีความจำเป็นต้องใช้มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) [6] ซึ่งมาตรฐานของ ว.ส.ท. ได้ถูกปรับปรุงให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของอุณหภูมิ ความชื้น ฝนตกหนัก หรือสภาวะการเกิดแผ่นดินไหว รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง การใช้มาตรฐานที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศ จะช่วยให้โครงสร้างมีความปลอดภัยมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดทางกฎหมายและกฎระเบียบของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

คานธรรมดา มักมีพฤติกรรมการรับแรงที่แรงภายในเกิดการกระจายตัวเป็นเชิงเส้นและมีโมเมนต์ดัด (Bending moment) เป็นปัจจัยหลักในการออกแบบ [7] ในทางตรงกันข้าม คานลิกมีการ

กระจายแรงภายในที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยแรงเฉือน (Shear force) มีอิทธิพลต่อคานมากกว่าโมเมนต์ดัด และมักเกิดการถ่ายแรงแบบคาน-เสา (Strut-and-tie model) ภายในโครงสร้าง [8] นอกจากนี้ คานลิกยังมีแนวโน้มที่จะเกิดความเค้นรวมตัว (Stress concentration) และการแตกร้าว (Cracking) ในบริเวณที่รับแรงเฉือนสูง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่คานธรรมดาพบไม่บ่อยนัก ด้วยความซับซ้อนดังกล่าว การออกแบบคานลิกจึงต้องอาศัยวิธีการวิเคราะห์ที่ละเอียดและแม่นยำมากกว่าคานธรรมดา วิธีการออกแบบแบบในทางปฏิบัตินิยมใช้ประสบการณ์หรือการประมาณเชิงตัวเลขอาจไม่เพียงพอ และมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้เมื่อต้องทำซ้ำหลายครั้ง [9] ดังนั้น การนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) มาใช้ในการออกแบบคานลิกจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เทคโนโลยี AI เช่น การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine learning) และวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสม (Optimization algorithms) มีศักยภาพในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณ [10]

อัลกอริทึมแมลงหวี่ (Fruit fly optimization algorithm, FOA) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่จำลองพฤติกรรมการหาอาหารของแมลงหวี่ โดยอาศัยประสาทสัมผัสกลิ่นและการมองเห็นในการระบุตำแหน่งแหล่งอาหารที่ดีที่สุด [11] เริ่มต้นจากการ

ส่วนตำแหน่งเริ่มต้นของกลุ่มแมลงหวี่ในพื้นที่ค้นหา จากนั้นคำนวณค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของตำแหน่งที่แมลงหวี่แต่ละตัวค้นพบ จากข้อมูลดังกล่าว แมลงหวี่จะปรับตำแหน่งเข้าใกล้จุดที่มีค่าที่ดีที่สุด โดยมีหลายงานวิจัยที่นำ FOA ไปประยุกต์ใช้ เช่น การออกแบบเส้นทางการขนส่ง (Logistics) [12] การจูนพารามิเตอร์ของระบบควบคุม (PID controller tuning) [13] การเลือกคุณลักษณะสำหรับการเรียนรู้ของเครื่องจักร [14] และการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบวิศวกรรมที่ซับซ้อน [15] เป็นต้น ด้วยความเรียบง่ายและประสิทธิภาพที่ดี FOA จึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาใดๆ ทั้งแบบมีเงื่อนไขและไม่มีเงื่อนไข [16]

จากปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กและประสิทธิภาพของ FOA ที่กล่าวถึงข้างต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอประสิทธิภาพของ FOA ในการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความประหยัดที่สุด โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น ขนาดประชากรของแมลงหวี่และจำนวนการทำซ้ำ เพื่อค้นหาค่าที่ทำให้ FOA มีประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการออกแบบ ทั้งนี้ การออกแบบจะพิจารณาปัจจัยด้านราคาค่าก่อสร้างและความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท. 1008-38) ในรูปแบบการออกแบบตามวิธีกำลัง [6] ผลการทดลองเชิงสถิติจะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ FOA อย่างชัดเจน

ข้อกำหนดการออกแบบคานลิก

คานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008-38 วิธีกำลัง [6] ได้กำหนดสมการสำหรับคำนวณและตรวจสอบสำหรับการออกแบบคานลิกไว้ดังนี้

กำลังรับโมเมนต์ดัดที่คำนวณออกแบบ ($\phi_m M_n$, กก.-ม.) ของหน้าตัดคานคำนวณได้จากสมการที่ (1)

ต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่กระทำ (M_u , กก.-ม.)

$$\phi_m M_n = \phi_m A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) > M_u \quad (1)$$

เมื่อ ϕ_m คือ ค่าแฟกเตอร์ลดกำลังรับโมเมนต์ดัดกรณีของคานลิกซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85 โดยที่ M_n คือ ค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานที่ยังไม่สูญเสียกำลัง (กก.-ม.) A_s คือ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง (ชม.²) f_y คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (กก./ชม.²) d คือ ค่าความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดคาน (ชม.) โดยวัดจากขอบบนสุดของหน้าตัดคานถึงระยะกึ่งกลางเฉลี่ยของเหล็กเสริมรับแรงดึงทุกชั้น และ a คือ ค่าหน่วยแรงรูปกล่องสี่เหลี่ยมเทียบเท่าในหน้าตัดคาน (ชม.) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) โดยเป็นสัดส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c , กก./ชม.²)

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (2)$$

อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมด้านทานโมเมนต์ดัดในหน้าตัดคาน (ρ) จะมีปริมาณที่คำนวณได้ตามสมการที่ (3) โดยจะต้องมีปริมาณมากกว่าอัตราส่วนขั้นต่ำ (ρ_{min}) ตามสมการที่ (4) และต้องมีค่าไม่เกินอัตราส่วนสูงสุดที่ยอมให้ (ρ_{max}) ตามสมการที่ (5)

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (3)$$

$$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} \quad (4)$$

$$\rho_{max} = 0.75 \left(\frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \right) \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) \quad (5)$$

เมื่อ b คือ ด้านแคบของหน้าตัดคาน (ชม.) โดยที่ β_1 มีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อ f'_c น้อยกว่าหรือเท่ากับ 280

กก./ชม.² หาก f'_c มากกว่า 280 กก./ชม.² สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) \quad (6)$$

สำหรับกรณีของคานาลึกจะมีแนวอัดในลักษณะค้ำยันระหว่างน้ำหนักรับบรรทุก และที่รองรับจึงต้องพิจารณากำลังรับแรงเฉือนตลอดความลึกของหน้าตัด กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในหน้าตัดคาน (ϕV_n , กก.) คำนวณได้จากสมการที่ (7) โดยพิจารณากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณออกแบบของคอนกรีตร่วมกับเหล็กเสริมจะต้องมีค่ามากกว่าแรงเฉือนประลัยที่กระทำ (V_u , กก.)

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s > V_u \quad (7)$$

เมื่อ ϕ คือ แฟคเตอร์ลดกำลังรับแรงเฉือนของคานมีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับ V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (กก.) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (8) และ V_s คือ กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริม (กก.) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$\phi V_c = \phi_v \left(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} \right) \left(0.5 \sqrt{f'_c} + 176 \rho \frac{V_u d}{M_u} \right) b d \quad (8)$$

$$\phi V_s = \phi_v \left(\frac{A_v}{s_v} \cdot \frac{1 + (L_n / d)}{12} + \frac{A_{vh}}{s_{vh}} \cdot \frac{11 - (L_n / d)}{12} \right) f_y d \quad (9)$$

เมื่อ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง (ชม.²) s_v คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมแนวตั้ง (ชม.) A_{vh} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน (ชม.²) s_{vh} คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอน (ชม.) และ L_n คือ ความยาวของคาน (ม.)

ค่า ϕV_c ที่คำนวณได้ต้องมีค่าไม่เกินค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ยอมให้ ($V_{c,allow}$, กก./ชม.²) ซึ่งมีค่าไม่เกินสมการที่ (10)

$$V_{c,allow} = \phi_v 1.6 \sqrt{f'_c} b d > \phi V_c \quad (10)$$

ข้อกำหนดระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน s_v และ s_{vh} ถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ (11) และ (12) หรือ มีระยะเรียงไม่เกิน 45 ซม. สำหรับการตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมขั้นต่ำสำหรับรับแรงเฉือนในแนวตั้งต้องมีค่ามากกว่า $0.0015b s_v$ และพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนขั้นต่ำต้องมีค่ามากกว่า $0.0025b s_{vh}$

$$s_v \leq \frac{d}{5} \leq 45 \text{ ซม.} \quad (11)$$

$$s_{vh} \leq \frac{d}{3} \leq 45 \text{ ซม.} \quad (12)$$

วิธีค้นหาแบบแมลงหวี่

FOA ถูกคิดค้นโดย Pan ในปี 2011 [17] เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมวิธีการหนึ่งที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมกรหาอาหารของแมลงหวี่ (Fruit fly) ที่มีความสามารถในการดมกลิ่นและการมองเห็นเพื่อค้นหาอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ FOA มีกระบวนการหาคำตอบตามรายละเอียดในหัวข้อย่อต่อไปนี้

1. การเริ่มต้น

ในการเริ่มต้นกระบวนการต้องกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นที่จำเป็นก่อนการใช้งาน ได้แก่ จำนวนแมลงหวี่ (Fruit fly population) และจำนวนการทำซ้ำ (Iterations) ซึ่งทั้ง 2 พารามิเตอร์นี้เป็นตัวควบคุมจำนวนครั้งในการปรับปรุงตำแหน่งและพื้นที่ค้นหา (Search space) ซึ่งเป็นขอบเขตที่แมลงหวี่จะสำรวจเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด [18] จากนั้น สุ่มกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของแมลงหวี่ในพื้นที่ค้นหาตามสมการที่ (13) โดยตำแหน่งเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการประเมินค่าสมการเป้าหมายและค้นหาตำแหน่งที่ดีกว่าในขั้นตอนถัดไป

$$x'_0 = Lower + Random(-1,1) \times Upper \quad (13)$$

เมื่อ x'_0 คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของแมลงหวี่ $Lower$ คือ ค่าต่ำสุดของตัวแปรออกแบบ $Upper$ คือ ค่าสูงสุดของตัวแปรออกแบบ และ $Random(-1,1)$ คือ ค่าสุ่มใดๆ ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

2. การบินแบบสุ่ม

เป็นกระบวนการที่แมลงหิวเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่แบบสุ่มรอบจุดปัจจุบันในพื้นที่การค้นหาโดยใช้ระยะการเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า มีลักษณะตามสมการที่ (14)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \text{Random}(-\text{Range}, \text{Range}) \quad (14)$$

เมื่อ x_i^{t+1} คือ ตำแหน่งใหม่ของแมลงหิว x_i^t คือ ตำแหน่งเดิมของแมลงหิว และ $\text{Random}(-\text{Range}, \text{Range})$ คือ ค่าสุ่มใดๆ ที่มีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนด โดยค่า Range ที่เหมาะสมต่อการใช้งานจะอยู่ในช่วงระหว่าง -5 ถึง 5 ตามคำแนะนำของ Xiao และคณะ [19]

3. การคำนวณระยะทางจากจุดศูนย์กลาง

การคำนวณระยะทางจากจุดศูนย์กลางใน FOA เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการวัดว่าตำแหน่งใหม่ของแมลงหิวอยู่ห่างจากจุดเดิมเป็นเท่าใด (D_i) โดยระยะทางนี้จะถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณค่าความเหมาะสมของตำแหน่งนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$D_i = |x_i^{t+1} - x_i^t| \quad (15)$$

4. การประเมินกลิ่น

การประเมินกลิ่นใน FOA เป็นขั้นตอนที่ใช้ค่าความเหมาะสม ($Smell_i$) ของตำแหน่งที่แมลงหิวค้นหาอยู่ กระบวนการนี้เลียนแบบการดมกลิ่นของแมลงหิวเพื่อหาตำแหน่งที่มีแหล่งอาหารดีที่สุด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16)

$$Smell_i = \frac{1}{D_i} \quad (16)$$

5. การปรับปรุงตำแหน่ง

ในการปรับปรุงตำแหน่งของแมลงหิวในรอบถัดไป ถ้าหากตำแหน่งใหม่ที่แมลงหิวแต่ละตัวค้นพบมีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าตำแหน่งเดิม แมลงหิวจะบินไปยังจุดนั้นทันที แต่ถ้าไม่ใช่ แมลงหิวก็จะยังคงบินอยู่ที่เดิม

6. การทำซ้ำ

กระบวนการดังกล่าวจะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 จนกว่าจะถึงเงื่อนไขที่กำหนดไว้ เช่น จำนวนรอบการทำซ้ำครบตามที่กำหนด หรือ เงื่อนไขอื่นที่เหมาะสมกับปัญหานั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดตามข้อกำหนดของแต่ละปัญหา

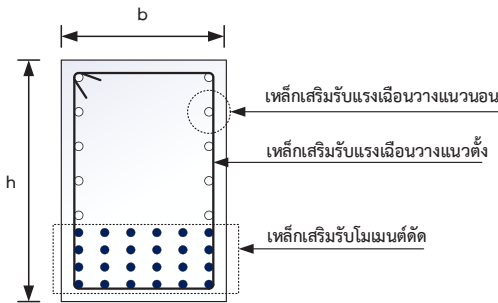
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ขอบเขตการออกแบบ

งานวิจัยนี้สร้างโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้ Microsoft visual studio 2022 คอมพิวเตอร์ Intel core i5-8350U CPU@1.70 GHz หน่วยความจำ Ram 32 GB ระบบปฏิบัติการ 64-bit และมีขอบเขตการออกแบบดังนี้ f'_c ที่เลือกได้เท่ากับ 140 180 210 240 280 300 320 350 400 420 และ 450 กก./ชม.² f_y ที่เลือกได้เท่ากับ 4,000 และ 5,000 กก./ชม.² เหล็กเสริมคอนกรีตทั้งในส่วนของการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเลือกใช้เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar, DB) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 12 16 20 25 28 32 36 และ 40 มม. โดยที่จำนวนเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดมีตั้งแต่ 2 เส้น ไปจนถึง 40 เส้น โดยปรับเพิ่มครั้งละ 1 เส้น ส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีระยะเรียงตั้งแต่ 10 ซม. ไปจนถึง 50 ซม. โดยปรับเพิ่มครั้งละ 2.5 ซม.

การออกแบบคานลิกโดยออกแบบหน้าตัดของคานให้สามารถรองรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอก สำหรับการเสริมเหล็กหลักรับแรงดัดจะเสริมเหล็กที่ส่วนล่างของคาน (Singly reinforced deep beam) เพื่อรองรับพฤติกรรม การรับโมเมนต์ดัดบวมที่เกิดขึ้นในคานลิกที่มีการรองรับแบบง่าย และมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน 2 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 2 โดยคานมีขนาดความกว้างเป็นค่า b และขนาดความลึกเป็นค่า h แบ่งการเสริมเหล็กออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ 1 การเสริมเหล็กในแนวนอนสำหรับรับโมเมนต์ดัด โดยแบ่งออกเป็น 4 ชั้น ชั้นละไม่เกิน 10 เส้น ส่วนที่ 2 การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวตั้ง (เหล็กถูกดัด) และส่วนที่ 3 การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวนอน

ที่ถูกเรียงถัดจากเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดขึ้นไปจนถึงขอบบนสุดของคาน



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน

2. สมการเป้าหมาย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความประหยัด ดังนั้นสมการเป้าหมายจึงถูกกำหนดเป็นสมการของราคารวมค่าก่อสร้างรวม ที่ส่งผลให้ผลการออกแบบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กมีความประหยัดมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้สมการที่ (17) เป็นสมการเป้าหมาย

$$f_{cost} = \text{Minimize} \sum (V_c C_c + V_s C_s + V_f C_f) L_n \quad (17)$$

เมื่อ f_{cost} คือ ราคารวมค่าก่อสร้างรวมของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก (บาท) L_n คือ ความยาวของคาน (ม.) V_c V_s และ V_f คือ ปริมาณของคอนกรีต (ม.³) เหล็กเสริม (กก.) และแบบหล่อ (ม.²) ตามลำดับ ในขณะที่ C_c C_s และ C_f คือ ราคาของคอนกรีต (บาท/ม.³) เหล็กเสริม (บาท/กก.) และแบบหล่อ (บาท/ม.²) ตามลำดับ

ราคาวัสดุที่ใช้คำนวณราคานำมาจากบัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานประจำปี 2567 ของกลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักอำนวยการ [20] โดยมีรายละเอียดราคาคอนกรีตผสมเสร็จที่รวมค่าแรงแล้วอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (18) โดยที่ราคาของเหล็กเสริมคอนกรีตระดับชั้น SD40 และ SD50 คิดเป็นราคาเฉลี่ยที่รวมค่าแรง

แล้วมีราคาเท่ากับ 29 และ 30 บาท/กก. และราคาของแบบหล่อที่รวมค่าแรงแล้วเท่ากับ 621 บาท/ม.²

$$C_c = 0.0062(f'_c)^2 - 1.4982(f'_c) + 3020 \quad (18)$$

3. ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมโดย FOA แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักดังแสดงในรูปที่ 3 โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

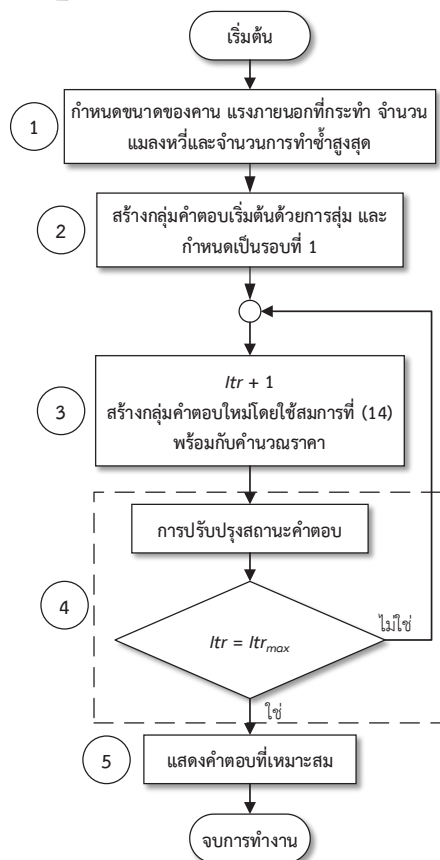
ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการกำหนดขนาดของคานก่อนการออกแบบได้แก่ b h และความยาวคาน (L_n) ต่อมำกำหนดน้ำหนักประลัยที่กระทำต่อคานได้แก่ M_u และ V_u จากนั้น กำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของ FOA ได้แก่ จำนวนแมลงหวี่สูงสุด (PN_{max}) และจำนวนการทำซ้ำสูงสุด (itr_{max}) ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มทำงานในการทำซ้ำ (itr) ครั้งที่ 1 เริ่มต้นสุ่มออกแบบตามขอบเขตของการออกแบบที่ได้กำหนดไว้โดยใช้สมการที่ (13) เพื่อสร้างกลุ่มคำตอบเริ่มต้น จากนั้น คำนวณกำลังรับน้ำหนักและราคาทุกคำตอบ ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะทำจนกว่าทุกคำตอบผ่านมาตรฐานการออกแบบ แล้วจึงทำต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 คือ การสุ่มสร้างคำตอบใหม่โดยอาศัยพื้นฐานของคำตอบเดิมที่ผ่านมาและปรับแต่งคำตอบตามสมการที่ (14) จากนั้น จึงคำนวณราคาและกำลังรับน้ำหนัก แล้วจึงทำต่อขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาคำตอบใหม่ทุกคำตอบ ถ้าหาก ผลการออกแบบของคำตอบใหม่มีความประหยัดกว่า มีความปลอดภัยและเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ ให้แทนที่คำตอบเดิมด้วยคำตอบใหม่ จากนั้น ตรวจสอบจำนวนการทำซ้ำ ถ้าหาก itr เท่ากับ itr_{max} ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 แสดงผลการออกแบบที่มีความประหยัดที่สุดในกลุ่ม แล้วแสดงรายละเอียดของผลการออกแบบที่เหมาะสม



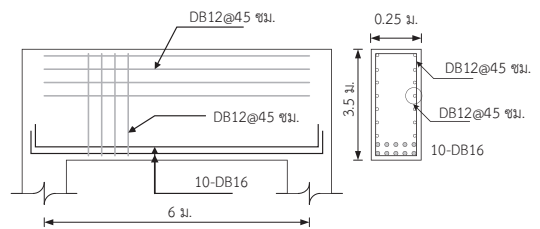
รูปที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

4. ตัวอย่างทดสอบ

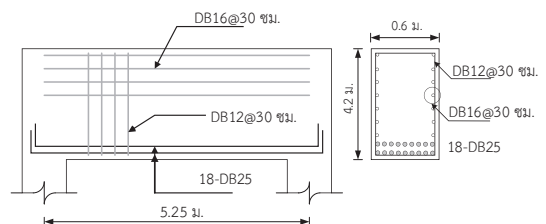
งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างออกแบบมาจาก Kong [21] จำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดสำหรับออกแบบดังตารางที่ 1 ประกอบด้วย แรงภายนอกที่กระทำและขนาดคานเบื้องต้นสำหรับออกแบบคาน ลึกประกอบด้วย ความยาว ความกว้างและความลึกของคาน โมเมนต์ดัดประลัยและแรงเฉือนประลัยที่แตกต่างกัน โดยในรูปที่ 4 คือรายละเอียดของผลการออกแบบเดิมที่ Kong [21] ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว

ตารางที่ 1 ตัวอย่างทดสอบ

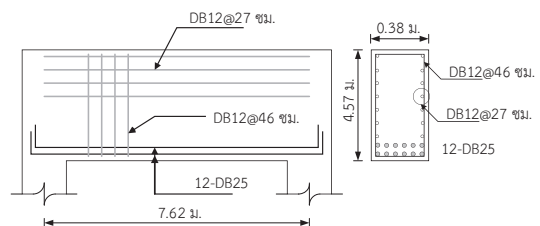
ตัวอย่างที่	1	2	3
L_n (ม.)	6.00	5.25	7.62
b (ซม.)	25	60	38
h (ซม.)	350	420	457
M_u (กก.-ม.)	251,831	838,200	582,369
V_u (กก.)	66,600	638,662	419,573



(ก) ตัวอย่างที่ 1



(ข) ตัวอย่างที่ 2



(ค) ตัวอย่างที่ 3

รูปที่ 4 รายละเอียดการออกแบบจาก Kong [21]

5. การศึกษาประสิทธิภาพของ FOA

การทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของ FOA ได้ทำการกำหนดจำนวน PN_{max} ในช่วง 100 ถึง 500 ตัว และ $litr_{max}$ ระหว่าง 50 ถึง 500 ครั้ง ซึ่งช่วงของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ผลการทดลองเบื้องต้นที่ดี โดยเป้าหมายการทดสอบนี้คือ เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์จะส่งผลให้ FOA มีประสิทธิภาพเพียงใดในการออกแบบคานลึกลดคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งงานวิจัยของ Hazim และคณะ [22] ได้ชี้ให้เห็นว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้อย่างเหมาะสมจะช่วยเพิ่มความสามารถของ FOA ในการแก้ปัญหาได้อย่างชัดเจน และสามารถนำไปปรับใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการทดสอบนี้ ทุกค่าพารามิเตอร์จะถูกนำไปใช้กับตัวอย่างทดสอบทั้งหมด โดยให้ FOA ออกแบบในแต่ละค่าพารามิเตอร์จำนวน 50 ครั้ง เพื่อประเมินผล

ด้วยการวิเคราะห์เชิงสถิติ และสุดท้ายคือการเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

1. ผลการทดสอบทางสถิติ

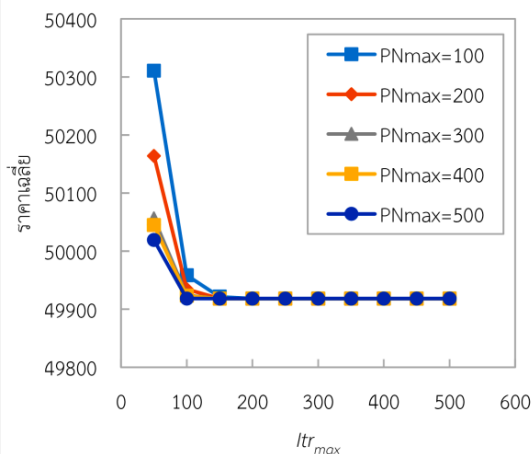
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวอย่างที่ 1 แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ PN_{max} ตั้งแต่ 100 ถึง 500 โดยในกราฟราคาเฉลี่ยรูปที่ 5(ก) พบว่า ค่าเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ Itr_{max} มีค่าเท่ากับ 100 และเริ่มคงที่เมื่อจำนวนการทำซ้ำเพิ่มขึ้น โดยทุกค่า PN_{max} มีแนวโน้มคล้ายกันและบรรจบกันเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 150 ในส่วนของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่แสดงในรูปที่ 5(ข) พบว่า ส่วนเบี่ยงเบนลดลงอย่างมากในช่วงต้นเช่นเดียวกับราคาเฉลี่ย และลดลงจนเป็นศูนย์ในทุกค่าของ PN_{max} เมื่อกำหนด Itr_{max} เท่ากับ 200 ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลที่ลดลงและความเสถียรของกระบวนการออกแบบเมื่อมีการทำซ้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นที่แน่ชัดแล้วว่า การเลือก Itr_{max} เท่ากับ 200 ส่งผลให้ FOA มีประสิทธิภาพสูงสุดในตัวอย่างนี้

จากรูปที่ 6 คือ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวอย่างที่ 2 พบว่า ราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ผ่านมา แต่ความผันผวนของ PN_{max} ตั้งแต่ 100 ถึง 300 มีความผันผวนมากที่สุด แต่เมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 300 พบว่า ค่า PN_{max} เท่ากับ 400 และ 500 ให้ผลลัพธ์ที่มีความเสถียรมากที่สุดเนื่องจากมีอัตราการบรรจบกันโดยไม่มีความแปรปรวนในทุกค่าของ Itr_{max} ทั้งในส่วนของราคาเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ FOA มีประสิทธิภาพสูงสุดในตัวอย่างนี้คือ การเลือกใช้ PN_{max} เท่ากับ 400 และ Itr_{max} เท่ากับ 300

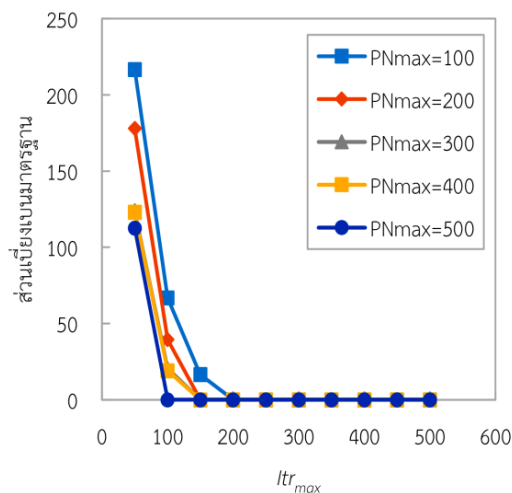
ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 3 แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งพบว่า เมื่อ PN_{max} เท่ากับ 200 ถึง 500 มีราคาเฉลี่ยบรรจบกันเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 300 ตามรูปที่ 7(ก) และบรรจบกันทั้งหมดเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 450 โดยมีแนวโน้มลักษณะการลู่เข้าเช่นเดียวกับ

ตัวอย่างที่ผ่านมา ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 7(ข) มีความแปรปรวนเฉพาะเส้นของ PN_{max} เท่ากับ 200 เมื่อกำหนด Itr_{max} เท่ากับ 400 ขณะที่เส้นอื่นมีการลดลงอย่างคงที่ ดังนั้น ในตัวอย่างนี้ FOA จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อกำหนด PN_{max} ตั้งแต่ 300 เป็นต้นไป และ Itr_{max} เท่ากับ 350 เนื่องจาก เมื่อกำหนด Itr_{max} เท่ากับ 350 มีการบรรจบกันของ PN_{max} เท่ากับ 300 ถึง 500 อย่างชัดเจน

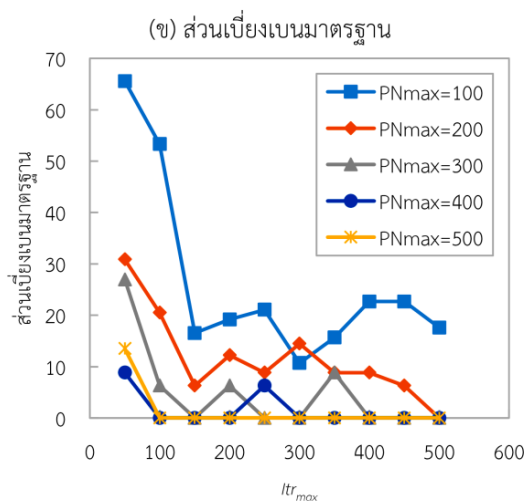
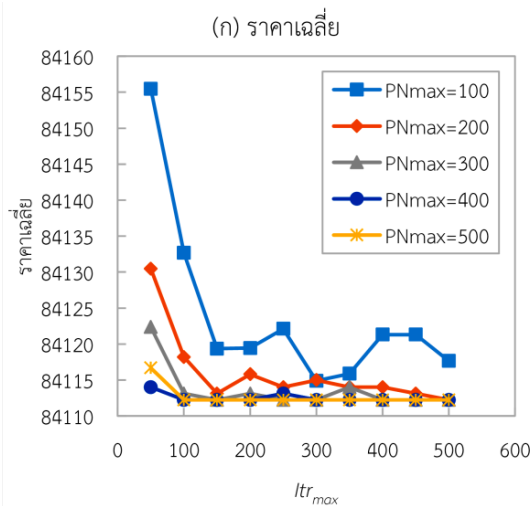
(ก) ราคาเฉลี่ย



(ข) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



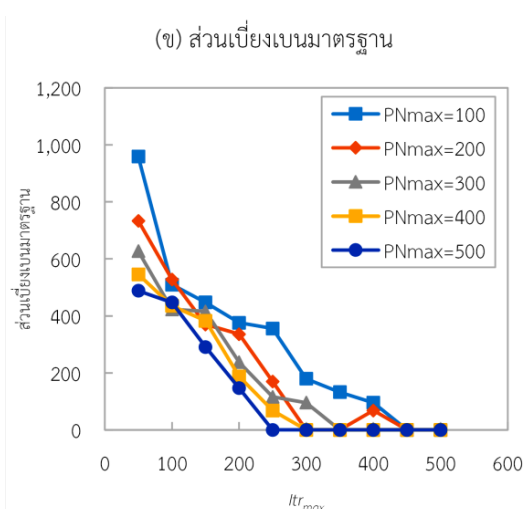
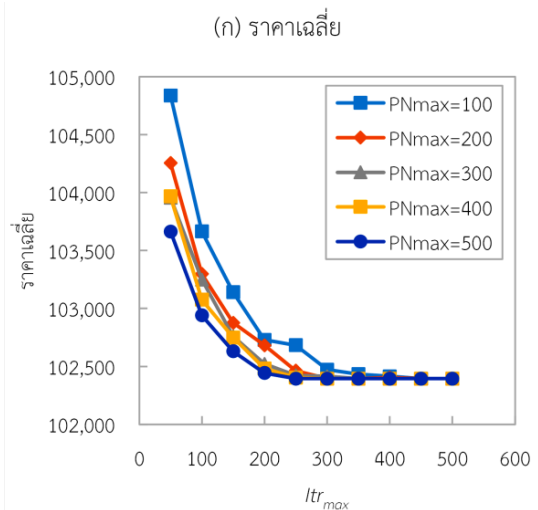
รูปที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 6 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 2

2. เปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่าง FOA และ Kong [21] ในตารางที่ 2 พบว่า FOA สามารถออกแบบได้อย่างประหยัดกว่างานวิจัยที่เปรียบเทียบทุกตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่ 2 และ 3 FOA จะเลือก f'_c ที่ต่ำกว่า ซึ่งทำให้ราคาค่าก่อสร้างลดลง แต่โครงสร้างยังคงปลอดภัยและเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ ในขณะที่การเลือก f_y ที่สูงกว่าสามารถลดปริมาณเหล็กเสริมลงทั้งเหล็กแนวตั้งและแนวนอน จึงทำให้ราคารวมของโครงสร้างมีความประหยัดกว่าร้อยละ 1 ถึง 14 ทั้งนี้ ผลการออกแบบที่เหมาะสมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่



รูปที่ 7 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 3

ผ่านมา [23] ที่ได้ทดลองใช้วิธีการค้นหาแบบค้างคา (Bat algorithm) ออกแบบ ซึ่งให้ผลลัพธ์ในลักษณะเดียวกันในทุกตัวอย่าง

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของ FOA สำหรับการออกแบบคานกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กโดยกำหนดใช้สมการเป้าหมายเป็นสมการของราคารวมค่าก่อสร้างที่มีความประหยัดมากที่สุด ประเมินประสิทธิภาพของ FOA โดยการกำหนดจำนวน PN_{max} ในช่วง 100 ถึง 500 ตัว และ ltr_{max} ระหว่าง 50 ถึง 500 และออกแบบในแต่ละค่าพารามิเตอร์จำนวน 50 ครั้ง กับตัวอย่างคานกลีคจำนวน 3 ตัวอย่าง จากนั้น วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสม

ตัวแปรออกแบบ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3	
	FOA	Kong [21]	FOA	Kong [21]	FOA	Kong [21]
f'_c (กก./ซม. ²)	140	210	300	420	320	420
f_y (กก./ซม. ²)	5,000	4,000	5,000	4,000	5,000	4,000
เหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด	12 – DB16	10 – DB16	34 – DB16	18 – DB25	15 – DB20	12 – DB25
A_s (ซม. ²)	24.13	20.10	68.36	88.35	47.12	58.9
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง	DB10@40 ซม.	DB12@45 ซม.	DB10@40 ซม.	DB12@30 ซม.	DB10@40 ซม.	DB12@46 ซม.
A_v (ซม. ²)	3.92	3.49	3.92	4.54	3.92	4.95
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน	DB10@40 ซม.	DB12@45 ซม.	DB10@35 ซม.	DB16@30 ซม.	DB10@40 ซม.	DB12@27 ซม.
A_{vh} (ซม. ²)	3.92	5.03	4.49	13.40	3.92	8.47
ราคาคอนกรีต (บาท)	15,392	15,639	41,391	46,099	42,020	46,109
ราคาเหล็กเสริม (บาท)	7,513	7,824	13,379	22,383	15,326	21,504
ราคาแบบหล่อ (บาท)	27,014	27,014	29,342	29,342	45,049	45,049
ราคาก่อสร้าง (บาท)	49,918	50,476	84,112	97,824	102,395	112,662
ร้อยละความแตกต่าง	1.10 %		14.02 %		9.11 %	

วิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งพบว่า FOA มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อกำหนด PN_{max} ตั้งแต่ 400 และ $l_{tr_{max}}$ ตั้งแต่ 350 เป็นต้นไป โดยผลวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่า ค่าเหล่านี้สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมทุกครั้งที่ออกแบบหรือคิดเป็นอัตราการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมร้อยละ 100 เช่นเดียวกับ งานวิจัยที่ผ่านมา [23] เพียงแต่ FOA ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่มากกว่า ยิ่งไปกว่านั้น ผลการออกแบบที่เหมาะสมยังมีความประหยัดมากกว่า Kong [21] โดยเฉลี่ยจากทั้ง 3 ตัวอย่างคิดเป็นร้อยละ 8

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete : (ACI 318-19) ; and commentary

(ACI 318-19). Farmington Hills, MI :American Concrete Institute.

[2] Adhikary, S.D., Li, B., and Fujikake, K. (2013). Strength and behavior in shear of reinforced concrete deep beams under dynamic loading conditions, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 259(1), June 2013, pp. 14-28.

[3] Kareim, A., Arafa, A., Hassanin, A., et al. (2020). Behavior and strength of reinforced concrete flanged deep beams with web openings, *Structures*, vol. 27(1), October 2020, pp. 506-524.

[4] Nassif, M., Erfan, A., Fadel, O., et al. (2021). Flexural behavior of high strength concrete deep beams reinforced with GFRP bars, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15(1), December 2021, e00613.

[5] Ibrahim, M.A., Thakeb, A., Mostfa, A.A., et al. (2018). Proposed formula for



design of deep beams with shear openings, *HBRC Journal*, vol. 14(3), December 2018, pp. 450-465.

[6] Engineering Institute of Thailand. Standard of reinforced concrete building, strength design method (E.I.T. 1008-38), Bangkok, Engineering Institute of Thailand.

[7] Liu, D., Qin, F., Di, J., Zhang, Z. (2023). Flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and ECC, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19(1), December 2023, e02270.

[8] Abbood, I. (2023). Strut-and-tie model and its applications in reinforced concrete deep beams: A comprehensive review, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19(1), December 2023, e02643.

[9] Ying, Z., Xilin, L., Dagen, W. and Ruifu, Z. (2012). A practical design method for reinforced concrete structures with viscous dampers, *Engineering Structures*, vol. 39(1), June 2012, pp. 187-198.

[10] Puttegowda, M., Nagaraju, S.B. (2025) Artificial intelligence and machine learning in mechanical engineering: Current trends and future prospects, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 142, February 2025, 109910.

[11] Wen-Tsao, P. (2012). A new Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the financial distress model as an example, *Knowledge-Based Systems*, vol. 26(1), February 2012, pp. 69-74.

[12] Lian, J. (2021). An optimization model of cross-docking scheduling of cold chain logistics based on fuzzy time

window, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 41(1). June 2021, pp. 1-15.

[13] Han, J., Wang, P. and Yang, X. (2012). Tuning of PID controller based on Fruit Fly Optimization Algorithm, paper presented in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Chengdu, China.

[14] Alexander, B., Michael, D. and Matthias M. (2020). The neural network behind the eyes of a fly, *Current Opinion in Physiology*, vol. 16(1), August 2020, pp. 33-42.

[15] Li, Y. and Han, M. (2020). Improved fruit fly algorithm on structural optimization, *Brain Informatics*, vol. 7(1), February 2020, pp. 1-13.

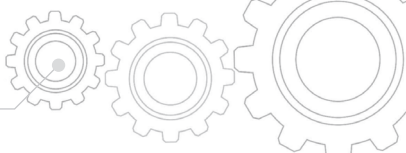
[16] Ranjeet, K., and Vijay, K. (2023). A systematic review on fruit fly optimization algorithm and its applications, *Artificial Intelligence Review*, vol. 56(11), November 2023, pp. 13015–13069.

[17] Pan, W. (2011). A new fruit fly optimization algorithm: Taking the financial distress model as an example, *Knowledge-Based Systems*, vol. 26(1), February 2012, pp. 69-74.

[18] Huiying, J. (2024). Design of fruit fly optimization algorithm based on Gaussian distribution and its application to image processing, *Systems and Soft Computing*, vol. 6(1), 2024, 200090.

[19] Xiao, W., Yang, Y., Xing, H. and Meng, X. (2015). Clustering Algorithm Based on Fruit Fly Optimization, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9436(1), pp. 408-419.

[20] Committee of Construction Price. (2024), Labor account/operation for



estimate and calculate price (revised edition) year 2024, Bangkok, Committee of Construction.

[21] Kong, F.K. (2002). Reinforced Concrete Deep Beams, New York, Taylor & Francis e-Library.

[22] Hazim, I. and Mesut, G. (2014). Parameter Analysis on Fruit Fly Optimization Algorithm, *Journal of Computer and Communications*, Vol.2 No.4(1), March 2014, pp. 1-5.

[23] Tapao, A. and Cheerarot, R. (2021). Optimum design of reinforced concrete deep beams using bat algorithm, *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 32(4), October 2021, pp. 29-41.