วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage
ปีที่ 32 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2564
Volume 32 Issue 4 October-December 2021
Received 10 March 2021
Revised 21 April 2021
Accepted 19 May 2021

การออกแบบที่เหมาะสมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีค้นหาแบบค้างคาว

OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS USING BAT ALGORITHM

อัศนัย ทาเภา[1] และเรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์[2*]
[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น
[2] รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[*]Corresponding author, E-mail: raungrut.c@msu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบที่เหมาะสมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีค้นหาแบบค้างคาว วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการออกแบบคานลึกตามมาตรฐานการออกแบบของ วสท. 1008-38 วิธีกำลังที่มีความประหยัด การศึกษาครั้งนี้ได้สร้างขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมขึ้นโดยใช้ Microsoft Visual Studio 2019 และทดลองออกแบบกับตัวอย่างคานลึกจำนวน 3 ตัวอย่าง ผลการทดลองพบว่า วิธีการค้นหาแบบค้างคาวสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กได้และได้รับผลการออกแบบที่เหมาะสมกว่าวิธีการออกแบบทั่วไปเฉลี่ยร้อยละ 6.5 โดยวิธีค้นหาแบบค้างคาวนี้ด้วยระบบชาญฉลาดแบบฝูงจะทำให้ได้รับคำตอบที่เหมาะสมในทุกครั้งที่ออกแบบเมื่อเลือกใช้จำนวนค้างคาวตั้งแต่ 150 ตัวและจำนวนรอบสูงสุด 80 รอบขึ้นไป

คำสำคัญ: คานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก; วิธีค้นหาแบบค้างคาว; การออกแบบที่เหมาะสม; ระบบชาญฉลาดแบบฝูง

ABSTRACT

This research proposes a suitable design of reinforced concrete deep beams using bat-type search. The purpose of the research is to design a deep beam design in accordant to the economical design standards of EIT 1008-38. Optimized design procedures were created using Microsoft Visual Studio 2019 and designed with the three examples of deep beam. The results candidated that the bat algorithm could be applied for the optimal design of reinforced concrete deep beams and obtains the optimum design results better than the conventional method by 6.5%. Moreover, the bat algorithm with swarm intelligence obtained the optimum solution on every single time when the choosing number of bat was greater than or equal to 150 and the maximum number of iteration was greater than or equal to 80.

KEYWORDS: reinforced concrete deep beam; bat algorithm; optimum design; swarm intelligence

Assanai Tapao[1] and Raungrut Cheerarot[2*]
[1]Assitant Professor, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Thailand
[2]Associate Professor, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Thailand

1. บทนำ

วิธีค้นหาแบบค้างคาว (Bat algorithm: BA) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการปล่อยคลื่นความถี่เพื่อบอกตำแหน่งของสิ่งกีดขวางของค้างคาวเมื่อบินออกหาอาหาร วิธีการนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 2010 โดย Yang [1] และถูกนำมาใช้อีกครั้งในการแก้ปัญหาแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์อย่างมีประสิทธิภาพในปี ค.ศ. 2011 [2] ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 Gaige และคณะ [3] ใช้ BA วางแผนเส้นทางการบินสำหรับยานพาหนะต่อสู้ทางอากาศยานไร้คนขับ (Uninhabited combat air vehicle: UCAV) ซึ่งผลการทดลองพบว่า BA กำหนดแผนเส้นทางการบินที่เป็นไปได้ดีกว่าวิธีการที่เปรียบเทียบทั้งหมด ในปี ค.ศ. 2013 Xie และคณะ [4] ได้ปรับปรุง BA ด้วยตัวปฏิบัติการความแตกต่าง (Differential operators) และวิถีการบินแบบ Lévy (Lévy flights trajectory) ซึ่งผลการทดลองพบว่า BA ที่ได้รับการปรับปรุงมีความเร็วในการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ในปี ค.ศ. 2015 Soliman และคณะ [5] ปรับปรุง BA ในการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine learning) โดยใช้รูปแบบความโกลาหล (Chaotic) ร่วมกับวิถีการบินแบบ Lévy ซึ่งผลการปรับปรุงพบว่า BA ที่ปรับปรุงแล้วค้นพบคำตอบที่เหมาะสมกว่า BA แบบดั้งเดิม ในปี ค.ศ. 2017 Chakri และคณะ [6] นำเสนอ Directional BA (dBA) ที่สามารถกำหนดทิศทางการบินของ BA ได้ ประสิทธิภาพของ dBA ถูกนำไปใช้แก้ปัญหาที่เหมาะสมแบบต่อเนื่อง (Continuous problems) และเปรียบเทียบกับอีกหลายวิธี ซึ่งผลการทดลองพบว่า dBA ได้รับผลการทดสอบทางสถิติที่ดีกว่าวิธีการที่ใช้เปรียบเทียบทั้งหมด ในปี ค.ศ. 2018 Bekdas และคณะ [7] ใช้ BA ปรับปรุง Tuned mass dumper (TMD) หรือ ลูกตุ้มเหล็กรักษาสมดุลสำหรับเพิ่มความปลอดภัยในอาคารต้านทานแผ่นดินไหวโดยเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ผลการทดลองพบว่า BA สามารถใช้ปรับปรุง TMD ได้และมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการอื่น ในปี ค.ศ. 2020 Yue และคณะ [8] นำเสนอการผสมผสานของ BA ร่วมกับตัวปฏิบัติการเชิงพันธุกรรมของวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) ในปัญหาการจำแนกความละเอียดของรูปภาพ (Image segmentation) และในปีเดียวกัน Tang และคณะ [9] ได้ปรับปรุง BA เพื่อใช้ในการค้นหาเป้าหมายของหุ่นยนต์หลายตัวในสภาพแวดล้อมที่ไม่รู้จัก ซึ่งผลการทดลองพบว่า BA ที่ถูกปรับปรุงมีประสิทธิภาพการค้นหาและสามารถประยุกต์ใช้กับระบบชาญฉลาดของหุ่นยนต์แบบหลายตัวได้ (Multirobot intelligent systems)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า BA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถดัดแปลงและใช้งานได้อย่างหลากหลาย แต่ยังไม่พบว่ามีงานวิจัยใดประยุกต์ใช้ BA สำหรับการออกแบบคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ BA สำหรับออกแบบคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์คือการเลือกพารามิเตอร์ของ BA ที่ทำให้ผลการออกแบบมีการใช้ มีความประหยัดที่สุด ที่มีความปลอดภัยและสอดคล้องมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง [10]

2. ข้อกำหนดการออกแบบคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008-38 วิธีกำลัง [10] ได้กำหนดสมการการคำนวณและการตรวจสอบสำหรับการออกแบบคานลึกไว้ดังนี้

กำลังรับโมเมนต์ดัดที่คำนวณออกแบบ ($\phi_m M_n$) ของหน้าตัดคานคำนวณได้จากสมการที่ (1) ที่ต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดที่ต้องการ (M_u)

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

เมื่อ ϕ_m คือ ค่าตัวคูณลดกำลังรับโมเมนต์ดัดกรณีของคานลึกซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85, M_n คือ ค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานที่ยังไม่คูณค่าลดกำลัง, A_s คือ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง, f_y คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม, d คือ ค่าความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดคาน และ a สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c) ตามสมการที่ (2)

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \tag{2}$$

อัตราส่วนของปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัดคาน (ρ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3) จะต้องมีค่ามากกว่าค่าขั้นต่ำที่ยอมให้ ($\rho_{\min}$) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4) แต่ต้องมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดที่ยอมให้ ($\rho_{\max}$) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \tag{3}$$

$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y} \tag{4}$$

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

เมื่อ β_1 เท่ากับ 0.85 สำหรับ f'_c น้อยกว่าหรือเท่ากับ 280 กก./ซม.^{2} หาก f'_c มากกว่า 280 กก./ซม.^{2} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05\left(\frac{f'_c - 280}{70}\right) \le 0.65 \tag{6}$$

สำหรับกรณีของคานลึกจะมีแนวอัดในลักษณะค้ำยันระหว่างน้ำหนักบรรทุก และที่รองรับจึงต้องพิจารณากำลังรับแรงเฉือนตลอดความลึกของหน้าตัด กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในหน้าตัดคาน ($\phi_v V_n$) คำนวณได้จากสมการที่ (7) โดยพิจารณากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณออกแบบของคอนกรีตร่วมกับเหล็กเสริมจะต้องมีค่ามากกว่าแรงเฉือนที่ต้องการกระทำ (V_u)

$$\phi_v V_n = \phi_v V_c + \phi_v V_s > V_u \tag{7}$$

เมื่อ ϕ_v คือ ตัวคูณลดกำลังรับแรงเฉือนของคานมีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับ V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (8) และ V_s คือ กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9)

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

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

เมื่อ A_v คือ เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง, s_v คือระยะเรียงของเหล็กเสริมแนวตั้ง, A_{vh} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน, s_{vh} คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอน และ L_n คือ ความยาวของคาน

สำหรับค่า $\phi_v V_c$ ที่คำนวณได้ต้องมีค่าไม่เกินค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ยอมให้ ($V_{c,allow}$) ซึ่งมีค่าไม่เกินสมการที่ (10)

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

ข้อกำหนดระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน s_v และ s_{vh} ถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ (11) และ (12) หรือ มีระยะเรียงไม่เกิน 450 มม. สำหรับการตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมขั้นต่ำสำหรับรับแรงเฉือนในแนวดิ่ง (A_v) ต้องมีค่ามากกว่า $0.0015bs_v$ และพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอน (A_{vh}) ขั้นต่ำต้องมีค่ามากกว่า $0.0025bs_{vh}$

$$s_v \le \frac{d}{5} \quad (11)$$

$$s_{vh} \le \frac{d}{3} \quad (12)$$

3. วิธีค้นหาแบบค้างคาว

วิธีค้นหาแบบค้างคาว (Bat Algorithm, BA) [1] นำแนวคิดการออกหาอาหารของค้างคาวซึ่งประกอบด้วยการบินและการปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonar wave) ออกไปกระทบกับวัตถุและสะท้อนกลับเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุ โดยพิจารณาระยะห่างของวัตถุจากอัตราการปล่อยคลื่นและความดังที่สะท้อนกลับมา (Echolocation) แล้วจึงเคลื่อนที่ ด้วยเหตุนี้ มันจึงสามารถบินได้อย่างคล่องแคล่ว ว่องไวแม้อยู่ในที่มืดโดยไม่ชนสิ่งกีดขวาง ซึ่งจากพฤติกรรมดังกล่าว สามารถจำแนกพฤติกรรมของ BA เป็นส่วนย่อยได้ดังนี้

3.1 การเคลื่อนที่ของค้างคาว

ค้างคาวจะปล่อยคลื่นความถี่ (Pulse frequency) มีการปรับช่วงความยาวของคลื่นความถี่เป็นของตัวเองโดยใช้สมการที่ (13) มีการปรับความเร็วของตัวเองโดยพิจารณาจากระยะห่างของตัวเองกับเพื่อนที่อยู่ในตำแหน่งที่ดีสุดในขณะนั้นตามสมการที่ (14) จากนั้น ถึงจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ด้วยความเร็วที่ถูกปรับค่าแล้วตามสมการที่ (15)

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\lambda \quad (13)$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^t - x_{best}^t) f_i \quad (14)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (15)$$

เมื่อ f_i คือ ค่าความถี่ของค้างคาวตัวที่ i, ค่า f_{min} คือ ค่าคลื่นความถี่ขั้นต่ำ, f_{max} คือ ค่าคลื่นความถี่สูงสุด, l คือ ค่าสุ่มที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1, ค่า v_i^{t+1} คือ ความเร็วใหม่, v_i^t คือ ความเร็วปัจจุบัน, x_i^t คือ ตำแหน่งปัจจุบัน, x_{best}^t คือ ตำแหน่งของค้างคาวตัวที่ดีที่สุดในช่วงเวลาปัจจุบัน และ x_i^{t+1} คือ ตำแหน่งใหม่ของค้างคาว

นอกจากการเคลื่อนที่จากการปรับคลื่นความถี่แล้ว ค้างคาวจะมีการขยับตัวเล็กน้อยเมื่อ r_i < Random(0,1) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาดังสมการที่ (16)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \mu A^t \quad (16)$$

เมื่อ μ คือ ค่าสุ่มที่อยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 และ A^t คือ ค่าเฉลี่ยความดังของค้างคาวในฝูงในช่วงเวลาปัจจุบัน

3.2 ความดังและอัตราการปล่อยคลื่น

ค่าความดัง (A_i) และอัตราการปล่อยคลื่น (r_i) ของค้างคาวแต่ละตัวมีการปรับปรุงในทุกรอบการทำงานตามสมการที่ (17) และ (18) ค่าความดังจะลดลงตลอดเวลาเมื่อค้างคาวเจอเหยื่อ (Prey) ในขณะที่ ค่าอัตราการปล่อยคลื่นเพิ่มขึ้น

$$A_i = \eta A_i \quad (17)$$

$$r_i = r_i^0 \left[1 - \exp(-\varpi t)\right] \quad (18)$$

เมื่อ A_i คือ ค่าความดังในช่วงเวลาปัจจุบัน, η คือ ค่าคงที่ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1, r_i คือ ค่าการปล่อยคลื่นใหม่, r_i^0 คือ ค่าการปล่อยคลื่นเริ่มต้น, ϖ คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 และค่า t คือ ช่วงเวลาหรือรอบการทำงานในปัจจุบัน

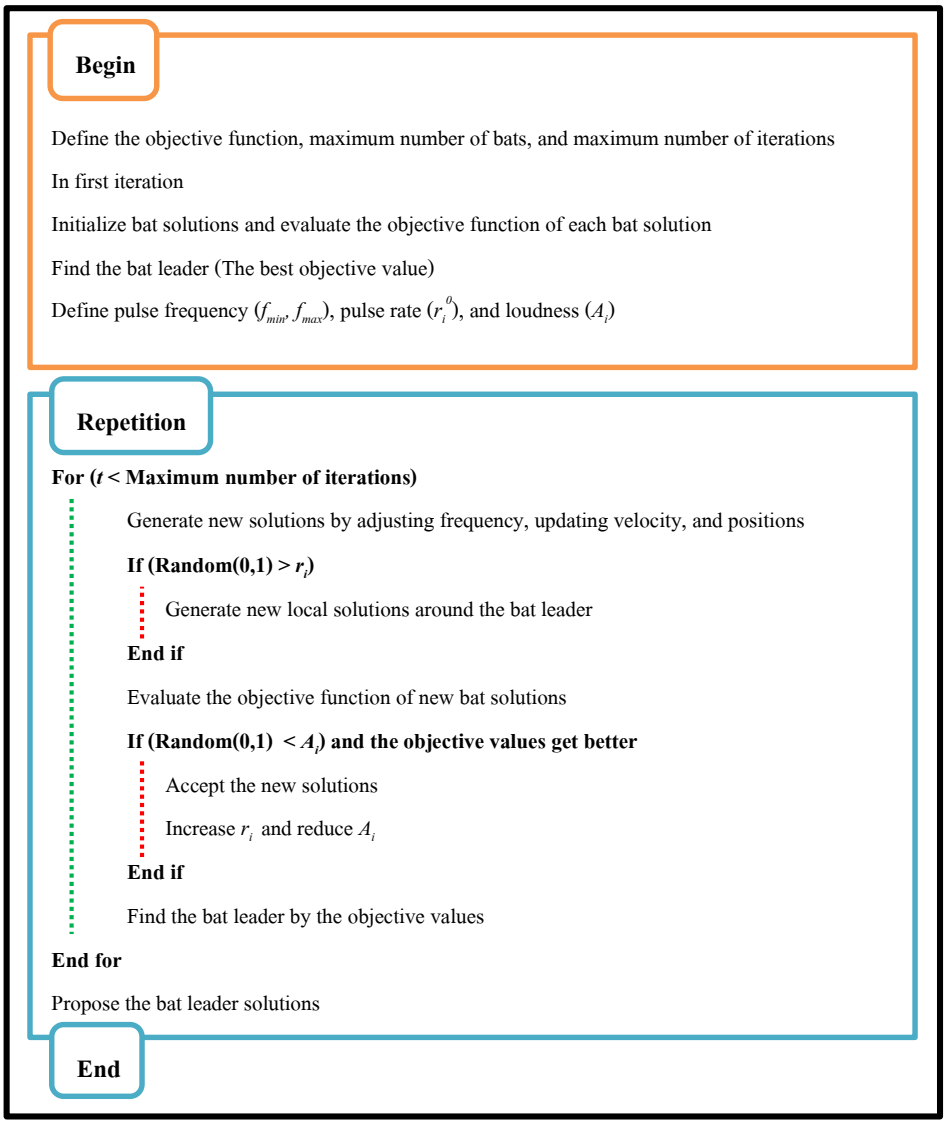
3.3 การปรับปรุงตำแหน่งปัจจุบัน

การตัดสินใจปรับปรุงตำแหน่งใหม่ของค้างคาวจะพิจารณาจาก 2 ค่า นั่นคือ A_i และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งค้างคาวจะปรับปรุงตำแหน่งใหม่ก็ต่อเมื่อ ค่า A_i มีค่ามากกว่าค่าสุ่มใดๆ ระหว่าง 0 ถึง 1 (Threshold) และค่าจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าที่ดีขึ้นกว่าเดิม

3.4 ลำดับการทำงาน BA

ลำดับการทำงานของ BA ในรูปแบบของรหัสเทียมแสดงในรูปที่ 1 โดยเริ่มต้นจากการกำหนดปัญหาและค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดซึ่งได้แก่ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา จำนวนค้างคาวสูงสุด (NB_{max}) และรอบการทำงาน (Itr_{max}) จากนั้นตำแหน่งเริ่มต้นของค้างคาวแต่ละตัวจะถูกสุ่มแบบวงกว้าง นั่นคือ คำตอบสามารถเป็นอะไรก็ได้ที่ไม่เกินขอบเขตของปัญหา ต่อมาตำแหน่งของค้างคาวแต่ละตัวจะถูกประเมินจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อใช้แบ่งแยกถึงลักษณะของคำตอบ แล้วจึงค้นหาตำแหน่งของค้างคาวที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีที่สุดแล้วจึงกำหนดช่วงค่า f_{min}, f_{max}, r_i, ϖ , η และ A_i

ขั้นตอนต่อไปเป็นการทำซ้ำซึ่งจะทำจนกว่าจำนวนรอบการทำงานปัจจุบันจะเท่ากับรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ โดยระหว่างการทำซ้ำ ค้างคาวทุกตัวต้องค้นหาตำแหน่งการบินใหม่ด้วยการปรับความถี่จากสมการที่ (13) จากนั้นปรับปรุงความเร็วด้วยสมการที่ (14) และคำนวณตำแหน่งใหม่จากสมการที่ (15) โดยค้างคาวจะมีการปรับปรุงตำแหน่งเล็กน้อยตามสมการที่ (16) เมื่อค่า r_i น้อยกว่า Random(0,1) แล้วจึงประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ต่อมา ค้างคาวแต่ละตัวจะพิจารณาตำแหน่งเดิมที่เป็นอยู่และตำแหน่งใหม่ที่คำนวณได้โดยใช้ค่า A_i และฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเคลื่อนย้ายตำแหน่ง ซึ่งเมื่อค้างคาวเคลื่อนย้ายตำแหน่งแล้ว ให้ค้นหาค้างคาวที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วให้กลับไปทำซ้ำอีกครั้งจนกว่ากระบวนการจะทำงานครบตามจำนวนรอบที่ได้กำหนดไว้ แล้วจึงแสดงคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีที่สุด



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของ BA ในรูปแบบของรหัสเทียม

4. การสร้างโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสม

4.1 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม

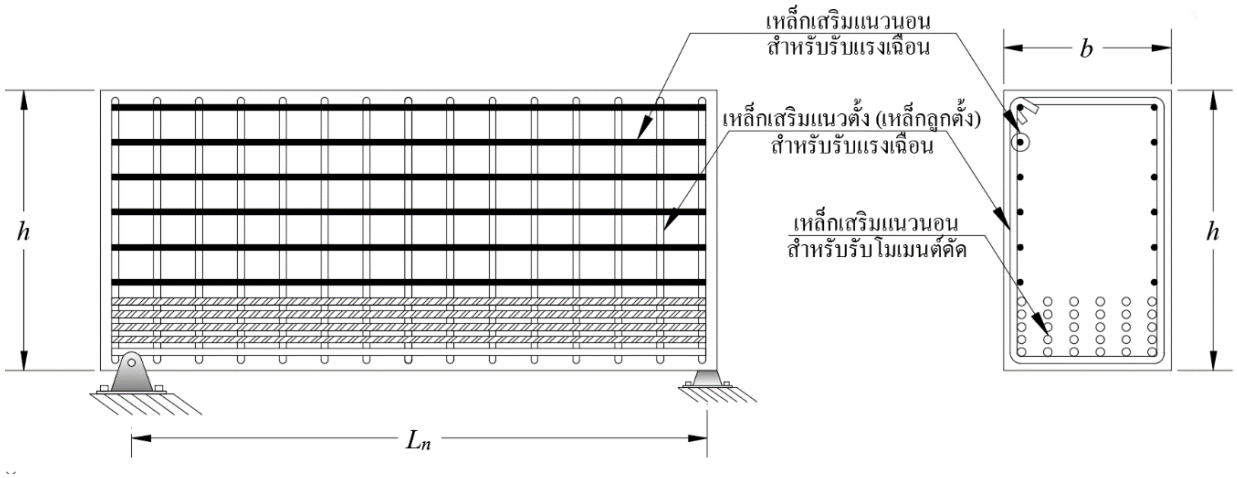
งานวิจัยนี้เขียนโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้ Microsoft visual studio ภายใต้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการวินโดว์ 10 แบบ 64 บิต และมีขอบเขตการทำงานตามตารางที่ 1 ประกอบด้วย f'_c ที่เลือกได้ เท่ากับ 140 180 210 240 280 300 320 และ 350 กก./ซม.^{2} f_y ที่เลือกได้ เท่ากับ 3,000 4,000 และ 5,000 กก./ซม.^{2} เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตทั้งในส่วนของการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนมีตั้งแต่ DB12 DB16 DB20 DB25 DB28 DB32 DB36 และ DB40 โดยที่จำนวนเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดมีตั้งแต่ 2 เส้น ไปจนถึง 50 เส้น โดยปรับเพิ่มครั้งละ 1 เส้น ส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีระยะเรียงตั้งแต่ 100 มม. ไปจนถึง 500 มม. โดยปรับเพิ่มครั้งละ 25 มม.

ตารางที่ 1 ขอบเขตการออกแบบของโปรแกรม

ตัวแปรออกแบบ	ต่ำสุด	ปรับเพิ่มครั้งละ	ค่าสูงสุด	หน่วย
f'_c	140	*	350	กก./ซม.^{2}
f_y	3,000	1,000	5,000	กก./ซม.^{2}
ขนาดเหล็กเส้นเสริม	DB12	-	DB40	
จำนวนเหล็กเส้นเสริม	2	1	50	เส้น
ระยะเรียงเหล็กเสริมรับแรงเฉือน	100	25	500	มม.

*หมายเหตุ ตามกำลังอัดที่กำหนด

รายละเอียดการเสริมเหล็กในคานลึกที่มีความยาว (L_n) ความกว้าง (b) และความลึก (h) แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 2 ได้แก่ ส่วนที่ 1 เหล็กเสริมในแนวนอนสำหรับรับโมเมนต์ดัดโดยแบ่งออกเป็น 5 ชั้น ชั้นละไม่เกิน 10 เส้น ส่วนที่ 2 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวตั้ง (เหล็กลูกตั้ง) และส่วนที่ 3 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนที่ถูกเรียงถัดจากเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดขึ้นไปจนถึงขอบบนสุดของคาน



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน

4.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และราคาวัสดุ

ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ฟังก์ชันของผลรวมราคาคอนกรีต เหล็กเสริมในคอนกรีตและแบบหล่อที่ส่งผลให้ได้รับผลการออกแบบของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประหยัดมากที่สุดตามสมการที่ (19)

$$F_{\cos t} = Minimize \sum M_C C_C + M_S C_S + M_F C_F \quad (19)$$

เมื่อ M_C M_S และ M_F คือ ปริมาณของ คอนกรีต เหล็กเสริม และแบบหล่อตามลำดับ สำหรับ C_C C_S และ C_F คือ ราคาของคอนกรีต เหล็กเสริม และแบบหล่อตามลำดับ

ราคาวัสดุและค่าแรงสำหรับใช้คำนวณราคาคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในตารางที่ 2 ประกอบด้วยราคาคอนกรีตผสมเสร็จ ราคาแบบหล่อ และเหล็กเสริม ที่นำมาจากบัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานสำหรับอาคารเรียน อาคารประกอบในสังกัดสำนักงานการศึกษาขั้นพื้นฐานปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 [11] ซึ่งราคานี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของแต่ละท้องที่

ตารางที่ 2 ราคาที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

รายการ	หน่วย	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ราคารวม
คอนกรีตผสมเสร็จและแบบหล่อ				
กำลังอัด 140 กก./ซม.^{2}	บาท/ม.^{3}	2,111	485	2,596
กำลังอัด 180 กก./ซม.^{2}	บาท/ม.^{3}	2,174	485	2,659
กำลังอัด 210 กก./ซม.^{2}	บาท/ม.^{3}	2,209	485	2,694
กำลังอัด 240 กก./ซม.^{2}	บาท/ม.^{3}	2,244	485	2,729
กำลังอัด 280 กก./ซม.^{2}	บาท/ม.^{3}	2,314	485	2,799
กำลังอัด 300 กก./ซม.^{2}	บาท/ม.^{3}	2,337	485	2,822
กำลังอัด 320 กก./ซม.^{2}	บาท/ม.^{3}	2,365	485	2,850
กำลังอัด 350 กก./ซม.^{2}	บาท/ม.^{3}	2,407	485	2,892
แบบหล่อคอนกรีต	บาท/ม.^{2}	493	133	626
เหล็กเสริมคอนกรีต				
ระดับชั้นคุณภาพ SD30	บาท/กก.	19	3.3	22.30
ระดับชั้นคุณภาพ SD40	บาท/กก.	19.5	3.3	22.80
ระดับชั้นคุณภาพ SD50	บาท/กก.	19.9	3.3	23.20

4.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสม

ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมโดย BA แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 3 แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

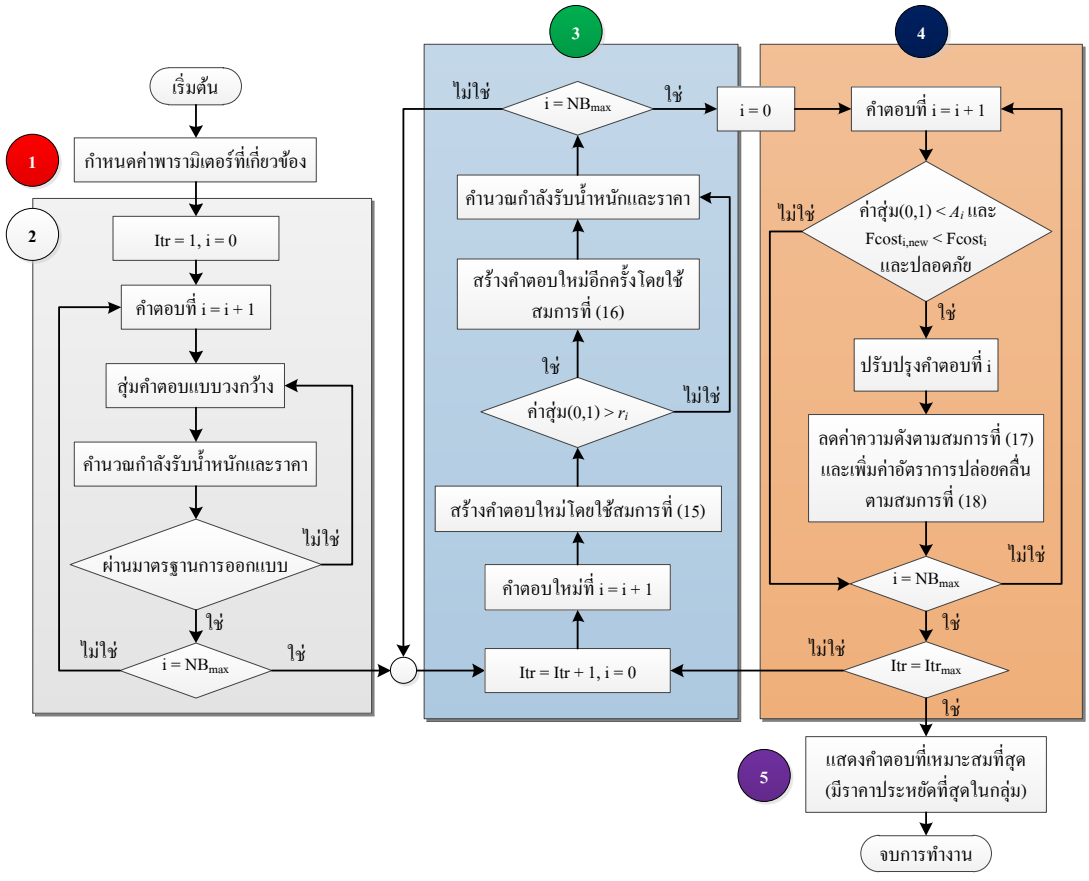
ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของคาน ได้แก่ ขนาดความกว้าง ความลึกและความยาวของคาน (b h และ L_n) และน้ำหนักประลัยที่กระทำกับคาน (M_u และ V_u) กำหนดพารามิเตอร์ของ BA ได้แก่ $f_{min}, f_{max}, \varpi, \eta, r_i^0, A_i$, $\text{Itr}_{\max}$ และ $\text{NB}_{\max}$

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณารอบที่ 1 เริ่มต้นสุ่มแบบวงกว้างเพื่อสร้างคำตอบที่เป็นไปได้ในขอบเขตการออกแบบที่กำหนดไว้ จากนั้น คำนวณกำลังรับน้ำหนักและราคาทุกคำตอบพร้อมกับกำหนดค่า r_i เท่ากับ r_i^0 และ A_i เท่ากับ A_i^t ซึ่งจะทำจนกว่าทุกคำตอบผ่านมาตรฐานการออกแบบ แล้วจึงทำต่อขั้นตอนที่ 3 โดยทุกคำตอบที่ได้ในขั้นตอนนี้มีพารามิเตอร์ของ BA เดียวกันและยังไม่มีการสร้างคำตอบตามวิธีของ BA

ขั้นตอนที่ 3 การทำงานในรอบต่อมาคือ สุ่มสร้างคำตอบใหม่โดยผสมผสานกับคำตอบในรอบที่ผ่านมาตามสมการที่ (15) และถ้าหากค่า r_i มีค่าน้อยกว่าค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1 คำตอบจะถูกสร้างขึ้นอีกครั้งโดยใช้สมการที่ (16) แล้วจึงคำนวณราคาและกำลังรับน้ำหนัก ในกระบวนการนี้จะทำจนกว่าจำนวนคำตอบใหม่มีค่าเท่ากับ $\text{NB}_{\max}$ แล้วค่อยทำต่อขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาคำตอบใหม่ลำดับที่ 1 จนถึง $\text{NB}_{\max}$ ถ้าหาก ผลการออกแบบของคำตอบใหม่รับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย ผ่านมาตรฐานการออกแบบ ค่า A_i มีค่าน้อยกว่าค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1 และราคาคำตอบใหม่ ($F_{\text{cost,new}}$) น้อยกว่าคำตอบเดิม ($F_{\text{cost,i}}$) ให้ปรับปรุงหรือแทนที่คำตอบปัจจุบันด้วยคำตอบใหม่ แล้วให้ลดค่า A_i และเพิ่มค่า r_i ตามสมการที่ (17) และ (18) จากนั้นตรวจสอบจำนวนรอบการทำงาน ถ้าหาก Itr เท่ากับ $\text{Itr}_{\max}$ ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 เลือกคำตอบที่มีความประหยัดที่สุดในกลุ่ม แล้วแสดงรายละเอียดผลการออกแบบที่เหมาะสม



รูปที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ BA

5. ตัวอย่างและวิธีการทดลอง

ตัวอย่างทดสอบการออกแบบนำมาจากงานวิจัยของ Kong [12] จำนวน 3 ตัวอย่าง มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3 เป็นตัวอย่างการออกแบบคานลึกที่มีความยาว ขนาดของคาน โมเมนต์ดัดประลัยและแรงเฉือนประลัยที่กระทำแตกต่างกัน

ตารางที่ 3 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่	**1**	**2**	**3**
ความยาว (ม.)	6.00	5.25	7.62
ความกว้าง (ม.)	0.25	0.60	0.38
ความลึก (ม.)	3.50	4.20	4.57
โมเมนต์ดัดที่ต้องการ (กก.-ม.)	251,831	838,200	582,369
แรงเฉือนที่ต้องการ (กก.)	66,600	638,662	419,573

ในทุกการออกแบบที่เหมาะสมของ BA กำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานซึ่งประกอบด้วย f_{min} เท่ากับ 0 ค่า f_{max} ค่า r_i^0 และ A_i เท่ากับ 1 ตามลำดับ ϖ เท่ากับ 0.1 และ η เท่ากับ 0.9 เนื่องจาก ค่าเหล่านี้ให้ผลคำตอบที่ดีเมื่อทดลองใช้ในการตรวจสอบเบื้องต้น จากนั้น การทดสอบการใช้งาน BA ได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1) การทดสอบทางสถิติเพื่อหา NB_{max} ที่เหมาะสมต่อการใช้งานซึ่งใช้ตัวอย่างที่ 1 กำหนดค่า NB_{max} ตั้งแต่ 50 ถึง 400 และปรับเพิ่มครั้งละ 50 โดยกำหนดใช้ Itr_{max} เท่ากับ 50 จากนั้น ออกแบบซ้ำพารามิเตอร์ละ 10 ครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ

2) การทดสอบเพื่อหาจำนวน Itr_{max} ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยในการทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างที่ 1 เช่นเดียวกัน โดยเลือกใช้ NB_{max} ที่เหมาะสมจากการทดสอบทางสถิติ และกำหนดค่า Itr_{max} ตั้งแต่ 20 ถึง 160 ปรับเพิ่มครั้งละ 20 จากนั้น ออกแบบซ้ำพารามิเตอร์ละ 10 ครั้ง เช่นเดียวกัน

3) การนำค่า NB_{max} และ Itr_{max} ออกแบบกับตัวอย่างอื่น เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมและเปรียบเทียบผลการออกแบบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

6. ผลการทดลอง

6.1 ผลการทดสอบทางสถิติ

ผลการทดสอบทางสถิติของการเลือกใช้ NB_{max} แสดงในตารางที่ 4 ซึ่งพบว่า BA ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมตั้งแต่การกำหนด NB_{max} ตั้งแต่ 50 ซึ่งมีราคาเท่ากับ 46,670 บาท และผลการทดสอบทางสถิติมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อ NB_{max} มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสถิติดีที่สุดเมื่อกำหนด NB_{max} ตั้งแต่ 150 ตัวขึ้นไป นั่นคือ ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย ค่าฐานนิยมและค่ามัธยฐานมีค่าเท่ากับ 46,670 บาท เมื่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า ไม่ว่าจะออกแบบกี่ครั้งก็จะได้คำตอบที่เหมาะสมเท่าเดิม ดังนั้น การเลือกใช้ NB_{max} ตั้งแต่ 150 ตัวขึ้นไปเหมาะสมต่อการใช้งานเพราะโอกาสที่จะค้นพบผลการออกแบบที่เหมาะสมคิดเป็นร้อยละ 100 แต่เพื่อเป็นการเผื่อความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการออกแบบกับตัวอย่างทดสอบอื่น งานวิจัยนี้เลือกใช้ NB_{max} เท่ากับ 200 ตัวเพื่อเพิ่มโอกาสต่อการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global optimum solution) ให้มากขึ้น

ผลการทดสอบทางสถิติของการกำหนดค่า Itr_{max} เมื่อเลือกใช้ NB_{max} เท่ากับ 200 ตัวแสดงในตารางที่ 5 พบว่า ค่าทางสถิติมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสถิติการเลือกใช้ NB_{max} นั่นคือ เมื่อ Itr_{max} เพิ่มมากขึ้น ค่าทางสถิติจะดีขึ้นเป็นลำดับจนถึงจุดที่ไม่สามารถ

เพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งค่า Itr_{max} ที่เหมาะสมต่อการใช้งานคือ 80 รอบแต่เพื่อเป็นการลดโอกาสการออกแบบที่อาจผิดพลาด งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ Itr_{max} เท่ากับ 100 รอบสำหรับการออกแบบตัวอย่างอื่นต่อไป

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบทางสถิติการเลือกใช้ NB_{max} ของตัวอย่างที่ 1

ค่าทางสถิติ	จำนวนค้างคาวสูงสุด (NB_{max})							
	50	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
ค่าต่ำสุด (บาท)	46,670	46,670	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670	46,670
ค่าสูงสุด (บาท)	46,716	46,716	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670	46,670
ค่าเฉลี่ย (บาท)	46,679	46,675	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670	46,670
ค่าฐานนิยม (บาท)	46,670	46,670	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670	46,670
ค่ามัธยฐาน (บาท)	46,670	46,670	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670	46,670
ค่า SD* (บาท)	19.18	14.39	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00	0.00

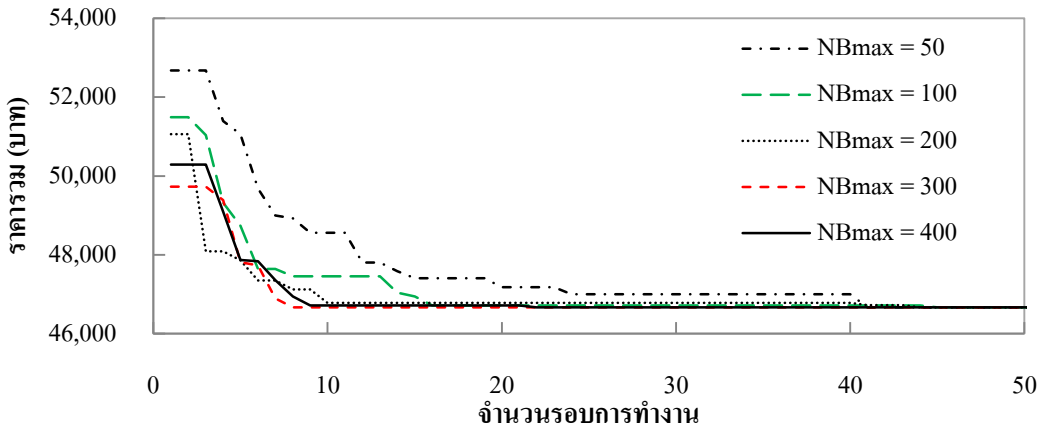
*หมายเหตุ SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณโดยใช้วิธี N-1

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติการเลือกใช้ Itr_{max} ของตัวอย่างที่ 1

ค่าทางสถิติ	จำนวนรอบสูงสุด (Itr_{max})							
	20	**40**	**60**	**80**	**100**	**120**	**140**	**160**
ค่าต่ำสุด (บาท)	46,670	46,670	46,670	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670
ค่าสูงสุด (บาท)	46,780	46,780	46,716	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670
ค่าเฉลี่ย (บาท)	46,697	46,681	46,675	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670
ค่าฐานนิยม (บาท)	46,670	46,670	46,670	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670
ค่ามัธยฐาน (บาท)	46,670	46,670	46,670	46,670	**46,670**	46,670	46,670	46,670
ค่า SD* (บาท)	46.15	34.74	14.39	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00

*หมายเหตุ SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณโดยใช้วิธี N-1

ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแสดงในรูปที่ 4 เป็นตัวอย่างการลู่เข้าของแต่ละจำนวน NB_{max} ของตัวอย่างที่ 1 ซึ่งพบว่า ความเร็วการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมแปรผันตรงกับค่า NB_{max} นั่นคือ เมื่อ NB_{max} เพิ่มขึ้น ความเร็วการลู่เข้าจะเร็วขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะเห็นว่า การเลือกใช้ค่า NB_{max} เท่ากับ 200 ตัวมีความเร็วการลู่เข้าที่เทียบเท่ากับการเลือกใช้ NB_{max} เท่ากับ 300 และ 400 ตัว โดยมีความเร็วเป็นอย่างมากในช่วง 10 รอบแรก และเข้าใกล้กับคำตอบที่เหมาะสมมากขึ้นในช่วง 20 รอบ และหลังจากนั้น มีการลู่เข้าที่เท่ากันจนเกือบบรรจบเป็นเส้นเดียว แสดงให้เห็นว่า การเลือกใช้ NB_{max} เท่ากับ 200 ตัวมีความเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน



รูปที่ 4 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม

6.2 ผลการออกแบบที่เหมาะสม

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของ BA ทั้ง 3 ตัวอย่าง เมื่อเลือกใช้ NB_{max} เท่ากับ 200 ตัวและ Itr_{max} เท่ากับ 100 รอบแสดงในตารางที่ 5 พบว่า BA เลือกใช้ f'_c ที่ต่ำกว่าและ f_y สูงสุด ปริมาณเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนที่น้อยกว่า และจำนวนเหล็กเสริมที่มากกว่า แต่ใช้เหล็กที่มีขนาดเล็กกว่าในตัวอย่างที่ 2 และ 3 จึงทำให้มูลค่าก่อสร้างของผลการออกแบบด้วย BA มีความประหยัดมากกว่าวิธีออกแบบทั่วไป [12] ร้อยละ 0.51 10.94 และ 8.00 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบที่เหมาะสม

ตัวแปรออกแบบ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3	
	BA	วิธีออกแบบทั่วไป [12]	BA	วิธีออกแบบทั่วไป [12]	BA	วิธีออกแบบทั่วไป [12]
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})	24.12	20.10	68.36	88.35	47.12	58.90
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง	DB10@400	DB10@450	DB10@400	DB12@300	DB10@400	DB12@457
A_v (ซม.^{2})	3.92	3.49	3.92	4.54	3.92	4.95
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน	DB10@400	DB12@450	DB10@350	DB16@300	DB10@400	DB12@267
A_{vh} (ซม.^{2})	3.92	5.03	4.48	13.40	3.92	8.47
ราคา (บาท)	46,670	46,907	77,260	86,747	94,977	103,241
ร้อยละความแตกต่าง	0.51		10.94		8.00	

7. สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้ BA สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่า BA สามารถประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมได้ ผลการทดสอบทางสถิติยังแสดงให้เห็นอีกว่า การเลือกใช้จำนวนค้างคาวสูงสุดตั้งแต่ 150 ตัวและจำนวนรอบการทำงานสูงสุดตั้งแต่ 80 รอบขึ้นไป ได้รับคำตอบที่เหมาะสมในทุกครั้งที่ออกแบบ นอกจากนี้ ผลการออกแบบที่เหมาะสมของ BA เลือกใช้กำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำกว่า เลือกใช้กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมสูงที่สุด และเลือกใช้ปริมาณเหล็กเสริมสำหรับต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่น้อยกว่า จึงทำให้ BA ได้รับผลการออกแบบที่มีความประหยัดกว่าวิธีทั่วไปร้อยละ 0.51 ถึง 10.94 อย่างไรก็ตาม ผลการออกแบบที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้เป็นเหมือนอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับประกอบการตัดสินใจของผู้ออกแบบ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจมีการคำนึงการออกแบบเพิ่มอีกหลายปัจจัยและมีความเป็นไปได้ที่ผู้ออกแบบที่มีความชำนาญแล้วอาจได้รับผลการออกแบบที่มีความประหยัดกว่าได้เช่นเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Yang, XS. *A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, in: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, 1st ed. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2010.

[2] Yang, XS. Bat algorithm for multi-objective optimization. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2011, 3 (5), pp. 267-274.

[3] Gaige, W. *et al*. A bat algorithm with mutation for UCAV path planning. *The Scientific World Journal*, 2012, 6 (1), pp. 1-15.

[4] Xie, J. *et al*. A novel bat algorithm based on differential operator and lévy flights trajectory. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2013, 4 (1), pp. 1-13.

[5] Soliman, OS. *et al*. A chaotic lévy flights bat algorithm for diagnosing diabetes mellitus. *International Journal of Computer Applications*, 2015, 111 (1), pp. 36-42.

[6] Chakri, A. *et al*. New directional bat algorithm for continuous optimization problems. *Expert Systems with Applications*, 2017, 69 (1), pp. 159-175.

[7] Bekdas, G. *et al*. A novel bat algorithm based optimum tuning of mass dampers for improving the seismic safety of structures. *Engineering Structures*, 2018, 159 (1), pp. 89-98.

[8] Yue, X. *et al*. Modified hybrid bat algorithm with genetic crossover operation and smart inertia weight for multilevel image segmentation. *Applied Soft Computing*, 2020, 90 (1), pp. 1-43.

[9] Tang, H. *et al*. A multirobot target searching method based on bat algorithm in unknown environments. *Expert Systems with Applications*, 2020, 141 (1), pp. 1-12.

[10] Engineering Institute of Thailand. *Standard of reinforced concrete building, strength design method (E.I.T. 1008-38)*, 9th ed. Bangkok: Engineering Institute of Thailand, 2015.

[11] Committee of construction price. *Labor account/operation for estimate and calculate price (revised edition) year 2019*, 1st ed. Bangkok, 2019.

[12] Kong FK. *Reinforced Concrete Deep Beams*, 1st ed. United States of America: CRC Press, 1998.