



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลกระทบของจำนวนหิ่งห้อยและจำนวนการทำซ้ำต่อวิธีค้นหาแบบหิ่งห้อยสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของคานลึกรีตเสริมเหล็ก

The effect of number of fireflies and number of iterations on the firefly algorithm for optimum design of reinforced concrete deep beams

อัศนัย ทาเถา*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Assanai Tapao*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus 40000

* Corresponding author.

E-mail: assanai.ta@muti.ac.th; Telephone: 043 283 707

วันที่รับบทความ 28 มิถุนายน 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 10 ตุลาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ 14 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของจำนวนหิ่งห้อยและจำนวนการทำซ้ำต่อวิธีค้นหาแบบหิ่งห้อยสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของคานลึกรีตเสริมเหล็ก วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการออกแบบคานลึกรีตตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลังที่มีความประหยัดที่สุดและศึกษาผลกระทบของจำนวนหิ่งห้อยและจำนวนการทำซ้ำต่อการได้ผลการออกแบบที่เหมาะสมแต่ละครั้ง ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Microsoft Visual Studio และทดลองออกแบบกับตัวอย่างคานลึกรีตจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยมีการกำหนดค่าจำนวนหิ่งห้อยไว้ตั้งแต่ 100 ถึง 500 ตัว และจำนวนการทำซ้ำตั้งแต่ 50 ถึง 500 ครั้ง ผลการทดลองพบว่า จำนวนหิ่งห้อยและจำนวนการทำซ้ำมีผลกระทบโดยตรงต่อการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมของวิธีค้นหาแบบหิ่งห้อย ยิ่งกว่านั้น การเลือกใช้จำนวนหิ่งห้อยตั้งแต่ 400 ตัวและจำนวนการทำซ้ำตั้งแต่ 250 ครั้งขึ้นไปจะส่งผลให้ได้รับราคาเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าการกระจายตัวแบบ t ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ ผลการออกแบบที่เหมาะสมยังมีความประหยัดมากกว่าวิธีการออกแบบอื่นที่ถูกนำมาเปรียบเทียบกับอยู่ในช่วงร้อยละ 2.79 - 15.28

คำสำคัญ

วิธีค้นหาแบบหิ่งห้อย จำนวนหิ่งห้อย จำนวนการทำซ้ำ การออกแบบที่เหมาะสม การออกแบบคานลึกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

This research presents a study on the effect of the number of fireflies and the number of iterations to firefly algorithm for the optimum design of reinforced concrete deep beams. The objective of this research is to achieve the most economical design of deep beams in accordance with the standards of EIT 1008-38 and study the effects of the number of fireflies and the number of iterations on obtaining the optimum design results each time. The optimization design process was created by Microsoft Visual Studio and was tested on three examples of deep beams, with the number of fireflies set from 100 to 500 and the number of iterations ranging from 50 to 500. The results indicated that the number of fireflies and the number of iterations directly effect to the discovery of optimal solutions by firefly algorithm. Moreover, the selection of the number of fireflies at least 400 individuals and the number of iterations at least 250 times which results in appropriate achieving an average cost, standard deviation, and t -distribution for practical application.

Furthermore, the optimum design results are more economical than the compared method, with cost saving ranging from 2.79 % to 15.28 %.

Keywords

firefly algorithm; number of fireflies; number of iterations; optimum design; reinforced concrete deep beam

1. บทนำ

วิธีค้นหาแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm, FA) เป็นระบบอัจฉริยะแบบกลุ่มที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์และปัญหาเชิงตัวเลขทางวิศวกรรม โดยในบทความของ Yang [1] ได้กล่าวไว้ว่า หิ่งห้อยเป็นแมลงที่สร้างแสงวูบวาบในระยะเวลาสั้นๆ เป็นจังหวะ ซึ่งเกิดจากกระบวนการเรืองแสงตามธรรมชาติ หน้าที่ของไฟกระพริบคือการดึงดูดหิ่งห้อยด้วยกันเอง หรือดึงดูดเหยื่อในระยะของแสง หรือใช้เป็นสัญญาณเตือนตัวมันเองเพื่อป้องกันนักล่าตัวอื่น ความเข้มของแสงจะแตกต่างกันไปตามระยะห่างของหิ่งห้อยแต่ละตัว นั่นคือ เมื่อระยะห่างระหว่างหิ่งห้อยมากขึ้น ค่าความเข้มของแสงจะลดลง ดังนั้น เมื่อค่าความเข้มของแสงน้อยลง ค่าความน่าดึงดูดจะน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อการบินไปยังตำแหน่งใหม่ๆ ของหิ่งห้อยตามไปด้วย จากกระบวนการดังกล่าว Yang แสดงให้เห็นแล้วว่า มันสามารถนำแนวคิดนี้มาใช้แก้ปัญหาคณิตศาสตร์ได้ [2] จึงทำให้ในปัจจุบัน FA ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาย่างต่อเนื่อง เช่น Apostolopoulos และคณะ [3] ใช้ FA แก้ปัญหาการปล่อยโหลดไฟฟ้าโดยผลการทดลองพบว่า FA มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการอื่นเมื่อเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม Balachennaiah และคณะ [4] ใช้ FA ลดการสูญเสียพลังงานในระบบไฟฟ้าซึ่งพบว่า FA มีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีการอื่นในการลดการสูญเสียของระบบไฟฟ้า Srivatsava และคณะ [5] ทดลองใช้ FA ในการค้นหาการสร้างลำดับการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด โดยผลการทดลองพบว่า FA สามารถค้นหาเส้นทางและใช้เวลาในการแก้ปัญหาน้อยที่สุด Kumbharana และคณะ [6] นำ FA มาใช้แก้ปัญหาค้นหาเส้นทางของพนักงานขาย ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า FA สามารถเลือกเส้นทางที่สั้นกว่าวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) วิธีค้นหาแบบฝูงมด (Ant colony optimization, ACO) และวิธีจำลองการหลอมอบเหนียว (Simulated annealing algorithm, SA) [7] Horng [8] ได้ทดลองใช้ FA เพื่อหาปริมาณเวกเตอร์ (Vector quantization)

สำหรับการบีบอัดขนาดของรูปภาพ ซึ่งผลการทดลองพบว่า FA สามารถทำให้ขนาดของรูปภาพเล็กลงแต่ยังคงความคมชัดเดิมไว้ได้ และ GAO และคณะ [9] ทดลองใช้ FA ในการติดตามวัตถุที่มีการเคลื่อนไหว ซึ่งพบว่า FA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเคลื่อนที่เร็วเร็วกว่าวิธีการที่ถูกเปรียบเทียบทั้งหมด เป็นต้น นอกจากนี้ ยังพบว่า มีการประยุกต์ใช้ FA ในการออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น ทาเกาและคณะ [10] ใช้ FA ออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างค้ำยันคอนกรีตเสริมเหล็ก [11] ที่มีความประหยัดที่สุด ผลการทดลองพบว่า FA สามารถออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เป็นต้น

สำหรับคานาลูกคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างคานขนาดใหญ่ที่มีสมการการคำนวณซับซ้อนกว่าคานทั่วไป จำเป็นต้องตรวจสอบความแข็งแรงอย่างพิถีพิถันให้สอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบทั้งหมด ทำให้กระบวนการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปมีความยุ่งยาก ใช้เวลานาน และอาจเกิดข้อผิดพลาดจากการคำนวณที่ซับซ้อนของผู้ออกแบบได้ ในอดีตเคยมีการใช้วิธีการค้นหาแบบค้างคาว (Bat algorithm, BA) [12] เพื่อแก้ปัญหานี้ พบว่า BA สามารถช่วยออกแบบได้อย่างแม่นยำ ลดระยะเวลาและข้อผิดพลาดในการออกแบบ หากเลือกจำนวนค้างคาวและการทำซ้ำที่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของจำนวนหิ่งห้อยและการทำซ้ำของ FA ต่อราคาค่าก่อสร้างในการออกแบบคานาลูกคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยต้องการแสดงให้เห็นว่า FA เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ สามารถออกแบบโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย ประหยัด และสอดคล้องตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง) อีกทั้งยังวิเคราะห์ถึงผลกระทบของจำนวนหิ่งห้อยและจำนวนการทำซ้ำแต่ละค่าที่ส่งผลต่อราคาของค่าตอบที่เหมาะสมโดยประเมินจากการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแนวทางต่อการประยุกต์ใช้ FA ในโครงสร้างหรือปัญหาอื่นๆ โดยไม่จำเป็นต้อง

เลือกค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จากการลองผิดลองถูก (Trial and error)

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

2. ข้อกำหนดการออกแบบคานาลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานาลิกคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008-38 วิธีกำลัง [13] ได้กำหนดสมการสำหรับคำนวณและตรวจสอบสำหรับการออกแบบคานาลิกไว้ดังนี้

กำลังรับโมเมนต์ดัดที่คำนวณออกแบบ ($\phi_m M_n$, กก.-ม.) ของหน้าตัดคานาคำนวณได้จากสมการ (1) ต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่กระทำ (M_u , กก.-ม.)

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

เมื่อ ϕ_m คือ ค่าตัวคูณลดกำลังรับโมเมนต์ดัดกรณีของคานาลิกซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85 โดยที่ M_n คือ ค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานาที่ยังไม่คูณค่าลดกำลัง (กก.-ม.) A_s คือ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง (ชม.²) f_y คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (กก./ชม.²) d คือ ค่าความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดคานา (ชม.) และ α คือ ค่าหน่วยแรงรูปกล่องสี่เหลี่ยมเทียบเท่าในหน้าตัดคานา (ชม.) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) โดยเป็นสัดส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c , กก./ชม.²)

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

อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมด้านทานโมเมนต์ดัดในหน้าตัดคานา (ρ) จะมีปริมาณที่คำนวณได้ตามสมการ (3) โดยจะต้องมีปริมาณมากกว่าอัตราส่วนขั้นต่ำ ($\rho_{\min}$) ตามสมการ (4) และต้องมีค่าไม่เกินอัตราส่วนสูงสุดที่ยอมให้ ($\rho_{\max}$) ตามสมการ (5)

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

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

เมื่อ β_1 คือ ด้านแคบของหน้าตัดคานา (ชม.) โดยที่ β_1 มีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อ f'_c น้อยกว่าหรือเท่ากับ 280 กก./ชม.² หาก f'_c มากกว่า 280 กก./ชม.² สามารถคำนวณได้จากสมการ (6)

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

สำหรับกรณีของคานาลิกจะมีแนวอัดในลักษณะค้ำยันระหว่างหน้าทับบรรทุก และที่รองรับจึงต้องพิจารณากำลังรับแรงเฉือนตลอดความลึกของหน้าตัด กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดในหน้าตัดคานา ($\phi_v V_n$, กก.) คำนวณได้จากสมการ (7) โดยพิจารณากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณออกแบบของคอนกรีตร่วมกับเหล็กเสริมจะต้องมีค่ามากกว่าแรงเฉือนประลัยที่กระทำ (V_u , กก.)

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

เมื่อ ϕ_v คือ ตัวคูณลดกำลังรับแรงเฉือนของคานามีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับ V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (กก.) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (8) และ V_s คือ กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริม (กก.) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (9)

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

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

เมื่อ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง (ชม.²) s_v คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมแนวตั้ง (ชม.) A_{v_h} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน (ชม.²)

s_{vh} คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอน (ซม.)

และ L_n คือ ความยาวของคาน (ม.)

ค่า $\phi_v V_c$ ที่คำนวณได้ต้องมีค่าไม่เกินค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ยอมให้ ($V_{c,allow}$, กก./ซม.²) ซึ่งมีค่าไม่เกินสมการ (10)

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

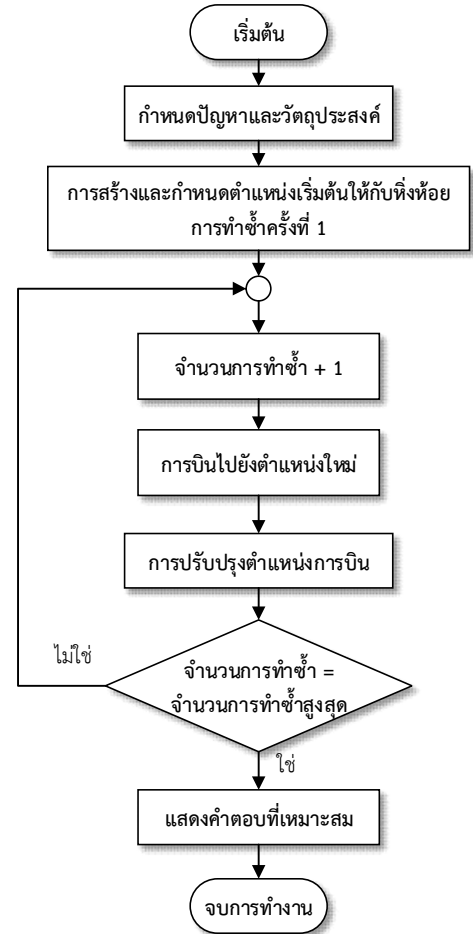
ข้อกำหนดระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน s_v และ s_{vh} ถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการ (11) และ (12) หรือ มีระยะเรียงไม่เกิน 45 ซม. สำหรับการตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมชั้นต่ำสำหรับรับแรงเฉือนในแนวดิ่งต้องมีค่ามากกว่า $0.0015bs_v$ และพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนชั้นต่ำต้องมีค่ามากกว่า $0.0025bs_{vh}$

$$S_v \leq \frac{d}{5} \quad (11)$$

$$S_{vh} \leq \frac{d}{3} \quad (12)$$

3. วิธีค้นหาแบบหึ่งห้อย

วิธีค้นหาแบบหึ่งห้อย หรือ FA มีลำดับขั้นตอนการหาคำตอบดังรูปที่ 1 โดยเริ่มจากการกำหนดปัญหาที่มีวัตถุประสงค์ที่แน่นอน จากนั้น FA จะสร้างหึ่งห้อยตามจำนวนที่ต้องการแล้วเริ่มปล่อยให้หึ่งห้อยบินไปยังตำแหน่งต่างๆ ที่ดีกว่าตำแหน่งเดิมในปริภูมิค้นหา โดยมีกระบวนการทำซ้ำจนกว่าจะครบจำนวนการทำซ้ำสูงสุดที่ถูกกำหนดไว้ ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดตามหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 ลำดับขั้นตอนการทำงานของ FA

3.1 การสร้างและกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้กับหึ่งห้อย

FA เริ่มต้นด้วยการสุ่มกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้หึ่งห้อยแต่ละตัว นั่นคือ การสุ่มตัวแปรออกแบบต่างๆ ของปัญหาที่ต้องการแก้ไขโดยใช้วิธีการสุ่มแบบวงกว้างตามขอบเขตของตัวแปรออกแบบที่ถูกกำหนดไว้ตามสมการ (13) จากนั้น หึ่งห้อยทุกตัวจะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นค่าบ่งบอกถึงปริมาณความเหมาะสมในแต่ละตำแหน่ง

$$x_i' = Lower + rand(0,1) \times (Upper - Lower) \quad (13)$$

เมื่อ x_i' คือ ตำแหน่งปัจจุบันของหึ่งห้อย Lower คือ ค่าต่ำสุดของตัวแปรออกแบบ Upper คือ ค่าสูงสุดของตัวแปรออกแบบ และ $rand(0,1)$ คือ ค่าสุ่มใดๆ ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

3.2 การบินไปยังตำแหน่งใหม่

การเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ของ หิ้งห้อยจะพิจารณาจากตำแหน่งเดิม อัตราค่าการดึงดูดหิ้งห้อย ตัวอื่น (β_0) และระยะห่างระหว่างตัวมันเองกับหิ้งห้อยตัวอื่น ตามสมการ (14)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha \left(\text{rand}(0,1) - \frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

เมื่อ x_i^{t+1} คือ ตำแหน่งใหม่ของหิ้งห้อย ค่า e คือ ค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์ที่เป็นฐานของลอการิทึมธรรมชาติ γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถูกดึงดูดด้วยแสงซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ส่วน x_j^t คือ ตำแหน่งปัจจุบันของเพื่อนใกล้เคียง r_{ij}^2 คือ ระยะห่างระหว่างหิ้งห้อย 2 ตัว โดยได้ถูกกำหนดไว้ให้อยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian distance) ตามสมการ (15) และค่า α คือ ค่าจำนวนใดๆ ที่กำหนดไว้ระหว่าง 0 ถึง 1

$$r_{ij} = \|x_j^t - x_i^t\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k}^t - x_{j,k}^t)^2} \quad (15)$$

3.3 การปรับปรุงตำแหน่งการบิน

หิ้งห้อยจะทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ก็ต่อเมื่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งใหม่ดีกว่าตำแหน่งเดิม หลังจากนั้น หิ้งห้อยจะปรับปรุงค่าความน่าดึงดูดดังสมการ (16) เพื่อสร้างค่าโอกาสในการการดึงดูดจากหิ้งห้อยตัวอื่น

$$\beta_0 = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (16)$$

4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.1 ขอบเขตการออกแบบที่เหมาะสม

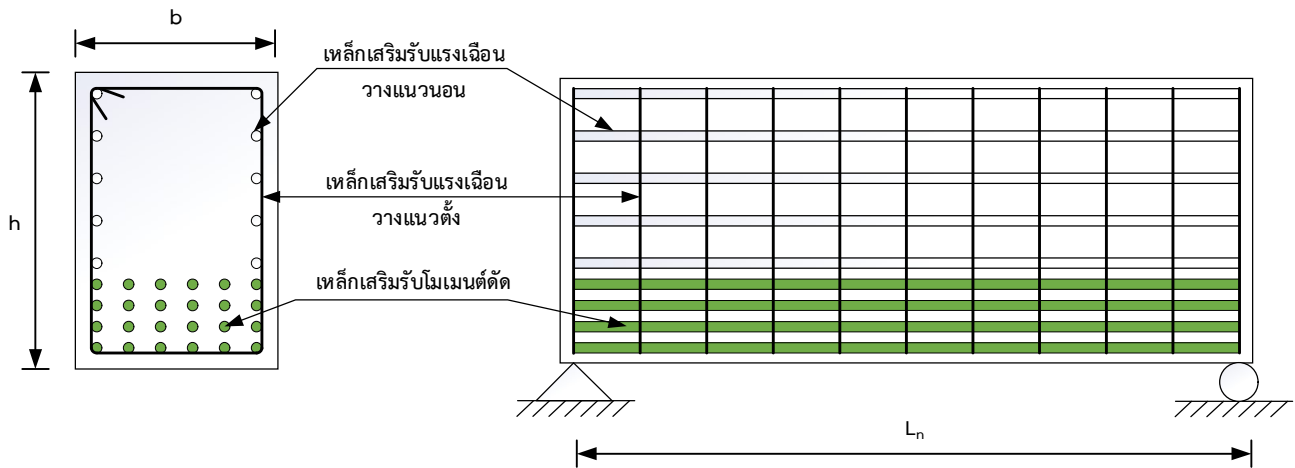
งานวิจัยนี้สร้างโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้ Microsoft visual studio และมีขอบเขตการทำงานตามตารางที่ 1 ประกอบด้วย f'_c ที่เลือกได้เท่ากับ 140 180 210 240 280 300 320 350 400 420 และ 450 กก./ชม.² f_y ที่

เลือกได้เท่ากับ 4,000 และ 5,000 กก./ชม.² เหล็กเสริมคอนกรีตทั้งในส่วนของการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเลือกใช้เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar, DB) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 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.

ตารางที่ 1 ขอบเขตการออกแบบที่เหมาะสม

ตัวแปร ออกแบบ	ค่าต่ำสุด	ปรับ เพิ่ม	ค่าสูงสุด	หน่วย
f'_c	140	-	450	กก./ชม. ²
f_y	4,000	1000	5,000	กก./ชม. ²
ขนาดเหล็กเสริม	16	-	40	มม.
จำนวนเหล็ก เสริม	2	1	40	เส้น
ระยะเรียงเหล็ก เสริมรับแรง เฉือน	10	2.5	50	ซม.

งานวิจัยนี้พิจารณาการออกแบบคานลึกลงโดยออกแบบหน้าตัดของคานให้สามารถรองรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดจากแรงภายนอก สำหรับการเสริมเหล็กหลักรับแรงดัดจะเสริมเหล็กที่ส่วนล่างของคาน (Singly Reinforced Deep Beam) เพื่อรองรับพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดบวมที่เกิดขึ้นในคานลึกลงที่มีการรองรับแบบง่าย และมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน 2 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 2 โดยคานมีความยาวเป็นค่า L_n มีขนาดความกว้างเป็นค่า b และขนาดความลึกเป็นค่า h แบ่งการเสริมเหล็กออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ 1 การเสริมเหล็กในแนวนอนสำหรับรับโมเมนต์ดัด โดยแบ่งออกเป็น 4 ชั้น ชั้นละไม่เกิน 10 เส้น ส่วนที่ 2 การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวตั้ง (เหล็กผูกตั้ง) และส่วนที่ 3 การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวนอนที่ถูกเรียงถัดจากเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดขึ้นไปจนถึงขอบบนสุดของคาน



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในหน้าตัดคาน

4.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการออกแบบคานลึกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความประหยัด ดังนั้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จึงถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันของราคารวมค่าก่อสร้างที่ส่งผลให้ผลการออกแบบคานลึกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กมีความประหยัดมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้สมการ (17) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$f_{\text{cost}} = \text{Minimize} \sum (M_c C_c + M_s C_s + M_f C_f) L_n \quad (17)$$

เมื่อ f_{cost} คือ ราคารวมค่าก่อสร้างรวมของคานลึกลีคคอนกรีตเสริมเหล็ก (บาท) M_c M_s และ M_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

4.3 ราคาที่ใช้ในงานวิจัย

ราคาวัสดุที่ใช้คำนวณราคานำมาจากบัญชีราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานประจำปี 2566 ของกลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักอำนวยการ [14] โดยมีรายละเอียดราคาราคาของคอนกรีตผสมเสร็จที่รวมค่าแรงแล้วของแต่ละกำลังอัดแสดงในตารางที่ 2 โดยที่ราคาของเหล็กเสริมคอนกรีตระดับชั้น SD40 และ SD50 คิดเป็นราคาเฉลี่ยที่รวมค่าแรงแล้วมีราคาเท่ากับ 28.72 และ 29.34 บาท/กก. และราคาของแบบหล่อที่รวมค่าแรงแล้วเท่ากับ 533 บาท/ม.²

ตารางที่ 2 ราคาของคอนกรีตผสมเสร็จแต่ละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

กำลังอัด (ทรงกระบอก)	ราคาวัสดุรวมค่าแรง	หน่วย
140 กก./ชม. ²	2,869	บาท/ม. ³
180 กก./ชม. ²	2,884	บาท/ม. ³
210 กก./ชม. ²	2,905	บาท/ม. ³
240 กก./ชม. ²	2,942	บาท/ม. ³
280 กก./ชม. ²	3,014	บาท/ม. ³
300 กก./ชม. ²	3,058	บาท/ม. ³
320 กก./ชม. ²	3,108	บาท/ม. ³
350 กก./ชม. ²	3,194	บาท/ม. ³
400 กก./ชม. ²	3,366	บาท/ม. ³
420 กก./ชม. ²	3,445	บาท/ม. ³
450 กก./ชม. ²	3,574	บาท/ม. ³

4.4 ขั้นตอนการออกแบบคานลึกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม

ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมโดย FA แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักดังแสดงในรูปที่ 3 โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นจากการกำหนดขนาดของคานก่อนการออกแบบได้แก่ b h และ L_n ต่อมากำหนดน้ำหนักประลัยที่กระทำต่อคานได้แก่ M_u และ V_u จากนั้น กำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของ FA ได้แก่ จำนวนหิ้งห้อยสูงสุด (NF_{max}), จำนวนการทำให้สูงสุด ($I_{tr_{\text{max}}}$), α , และ γ ตามลำดับ

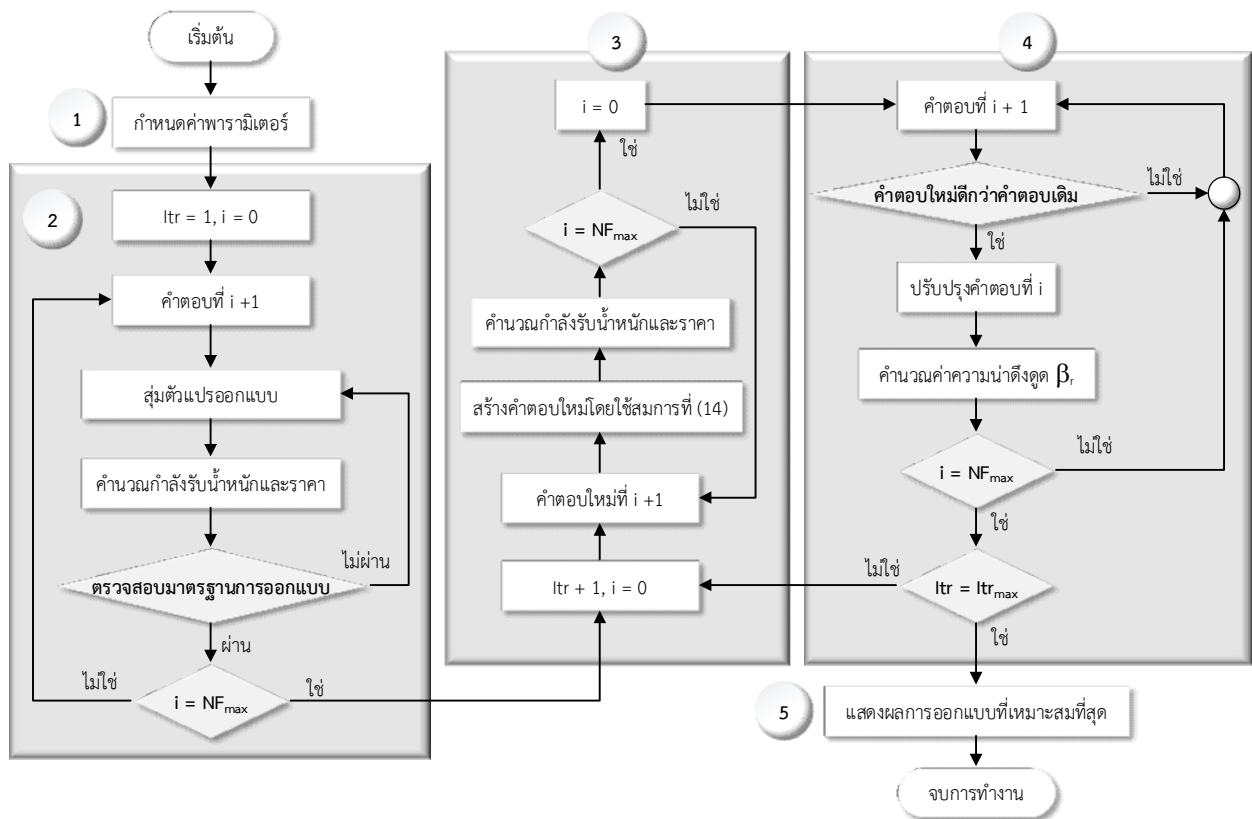
ขั้นตอนที่ 2 เริ่มทำงานในการทำซ้ำ (I_{tr}) ครั้งที่ 1 เริ่มต้นสุ่มออกแบบตามขอบเขตของการออกแบบที่ได้กำหนดไว้โดยใช้สมการ (13) เพื่อสร้างกลุ่มคำตอบเริ่มต้น จากนั้น คำนวณ

กำลังรับน้ำหนักและราคาทุกคำตอบ ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะทำจนกว่าทุกคำตอบผ่านมาตรฐานการออกแบบ แล้วจึงทำต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 คือ การสุ่มสร้างคำตอบใหม่โดยอาศัยพื้นฐานของคำตอบในการทำซ้ำที่ผ่านมาและปรับแต่งคำตอบตามสมการ (14) จากนั้น จึงคำนวณราคาและกำลังรับน้ำหนัก โดยในกระบวนการนี้จะทำจนกว่า จำนวนคำตอบใหม่มีค่าเท่ากับ NF_{max} แล้วจึงทำต่อขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาคำตอบใหม่ลำดับที่ 1 จนถึง NF_{max} ถ้าหาก ผลการออกแบบของคำตอบใหม่มีความประหยัคกว่า มีความปลอดภัยและเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ ให้แทนที่คำตอบปัจจุบันด้วยคำตอบใหม่ จากนั้น ตรวจสอบจำนวนการทำซ้ำ ถ้าหาก ltr เท่ากับ ltr_{max} ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้า ไม่ใช่ ให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 แสดงผลการออกแบบที่มีความประหยัคที่สุดในกลุ่ม แล้วแสดงรายละเอียดของผลการออกแบบที่เหมาะสม



รูปที่ 3 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ FA สำหรับออกแบบที่เหมาะสมของคานาลีกคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.5 ตัวอย่างและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างออกแบบมาจาก Kong [15] จำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเป็นตัวอย่างการออกแบบคานาลีกที่มีความยาว ความกว้าง ความลึกของคาน โมเมนต์ดัดประลัยและแรงเฉือนประลัยที่กระทำแตกต่างกัน

ตารางที่ 3 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

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของค่า NF_{max} และ Itr_{max} โดยกำหนดค่า α และ γ เท่ากับ 0.4 และ 0.6 ตามลำดับ และส่วนที่ 2 คือการเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในแต่ละส่วนมีรายละเอียดในการดำเนินงานดังนี้

ในส่วนที่ 1 จะทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของ FA นั่นคือ NF_{max} และ Itr_{max} โดยทำการศึกษา NF_{max} ตั้งแต่ 100 ถึง 500 และ Itr_{max} ตั้งแต่ 50 ถึง 500 ซึ่งจะทำให้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ละ 10 ครั้งในทุกตัวอย่าง จากนั้น ทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและการวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบการกระจายตัวแบบ t (t-distribution) เพื่อประเมินประสิทธิภาพแต่ละพารามิเตอร์ต่อการใช้งาน โดยกำหนดสมมติฐานหลัก (H_0) คือ ราคาของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดไม่มีความแตกต่างจากราคาเฉลี่ย และสมมติฐานรอง (H_1) คือ ราคาของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดมีความแตกต่างจากราคาเฉลี่ย ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 มีค่า t วิฤตเท่ากับ 2.82

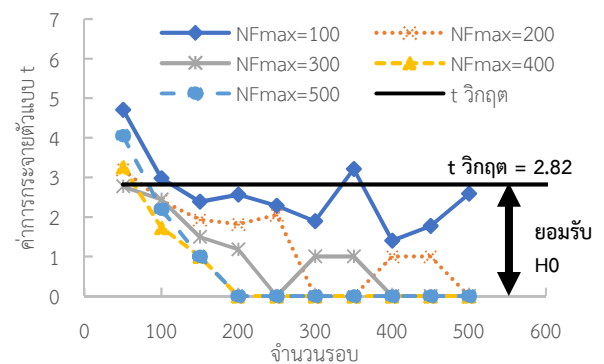
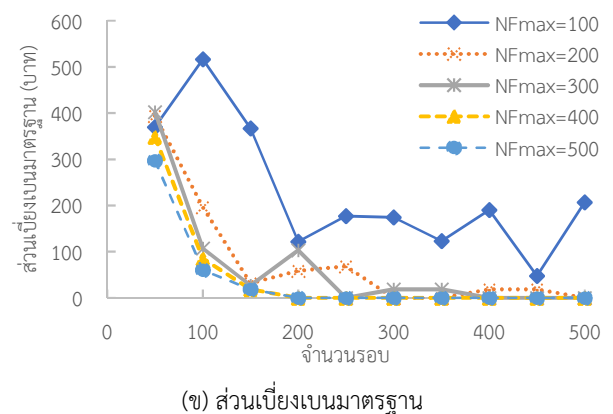
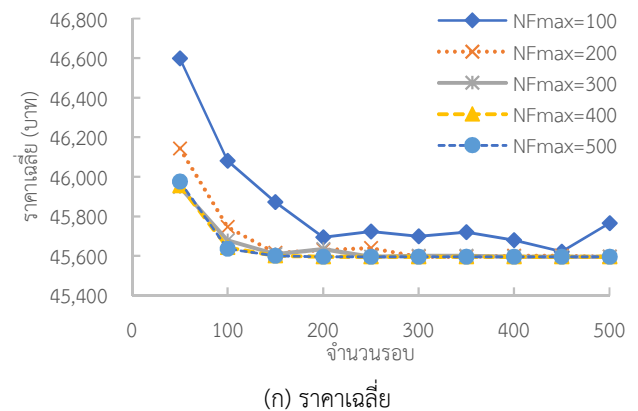
สำหรับส่วนที่ 2 ทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ FA กับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเปรียบเทียบในเรื่องของราคา การเลือกใช้กำลังของวัสดุและรายละเอียดการเสริมเหล็กในหน้าตัดคาน

5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองทางสถิติ

ผลการทดลองทางสถิติของตัวอย่างที่ 1 แสดงในรูปที่ 4 พบว่า คำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างนี้มีราคาเท่ากับ 45,596 บาท โดยที่ราคาเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าการกระจายตัวแบบ t มีอัตราลดน้อยลงอย่างต่อเนื่องเมื่อจำนวน NF_{max} และ Itr_{max} เพิ่มขึ้น ราคาเฉลี่ยที่แสดงในรูปที่ 4 (ก) แสดงให้เห็นว่า การเลือกใช้ NF_{max} เท่ากับ 300 400 และ 500 มีลักษณะการลู่ลงแทบจะบรรจบกันในทุก Itr_{max} และบรรจบกันเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 250 ถึง 500 ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 4 (ข) ที่มีทิศทางการลู่และการบรรจบที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ การเลือกใช้ NF_{max} เท่ากับ 400 และ 500 ได้รับผลของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

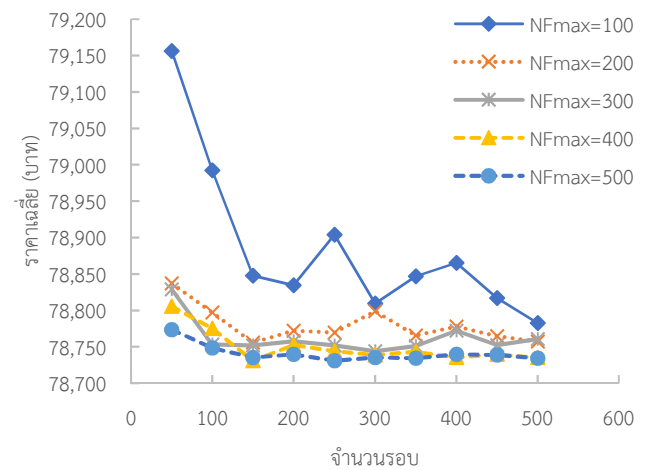
เท่ากับ 0 นั่นคือ FA สามารถออกแบบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ในทุกครั้งที่ออกแบบ คิดเป็นความสำเร็จในการออกแบบร้อยละ 100 ยิ่งกว่านั้น ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบ t ในรูปที่ 4 (ค) ยังช่วยแนะนำว่า การเลือกใช้ NF_{max} ตั้งแต่ 200 และ Itr_{max} ตั้งแต่ 100 เป็นต้นไป จะได้รับผลการออกแบบที่มีราคาของคำตอบที่เหมาะสมที่ไม่มีความแตกต่างจากราคาเฉลี่ยตามสมมติฐานหลัก H_0 เพราะว่า ค่าการกระจายตัวแบบ t ของมีค่าน้อยกว่าค่า t วิฤต



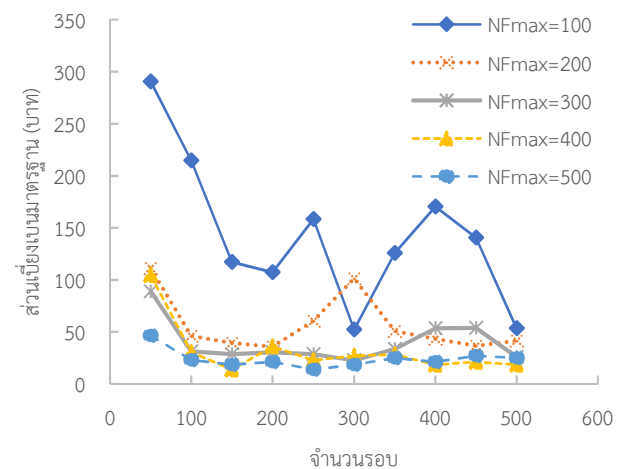
รูปที่ 4 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 1

รูปที่ 5 แสดงผลการทดลองทางสถิติของตัวอย่างที่ 2 ซึ่งพบว่า ราคาของคำตอบที่เหมาะสมในตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากับ 78,727 บาท โดยในส่วนของการค่าทางสถิติต่างๆ มีอัตราการน้อยลงเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 สำหรับราคาเฉลี่ยในรูปที่ 5 (ก) พบว่า การเลือกใช้ NF_{max} เท่ากับ 300 400 และ 500 มีลักษณะการลู่ลงใกล้เคียงบรรจบกันมาก และมีการบรรจบกันเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 250 ถึง 500 ในส่วนของการค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 5 (ข) พบว่า มีทิศทางการลู่ออกของการเลือกใช้ NF_{max} ตั้งแต่ 300 ขึ้นไปเมื่อ Itr_{max} เท่ากับ 100 ถึง 500 และมีเฉพาะเส้น NF_{max} เท่ากับ 300 ไม่มีการลู่ออกบรรจบเมื่อ Itr_{max} มากกว่า 350 นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบ t ในรูปที่ 5 (ค) สามารถแนะนำได้ว่า การเลือกใช้ NF_{max} ตั้งแต่ 400 เป็นต้นไป และ Itr_{max} ตั้งแต่ 150 เป็นต้นไป มีโอกาสที่จะได้รับผลการออกแบบที่มีราคาของคำตอบที่ไม่มีความแตกต่างจากราคาเฉลี่ยตามสมมติฐานหลัก H_0 มากกว่าค่าพารามิเตอร์อื่น

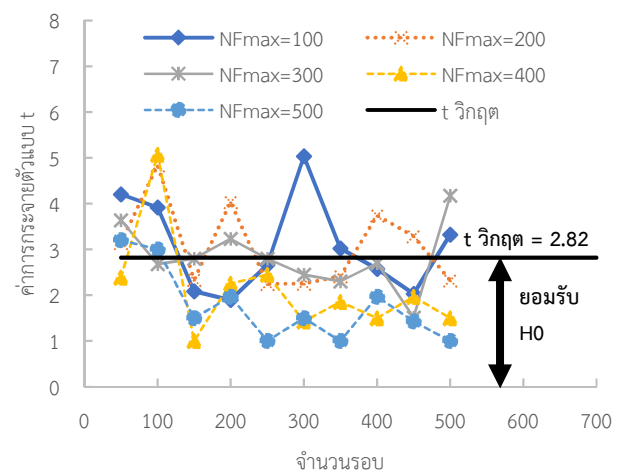
ผลการทดลองทางสถิติของตัวอย่างที่ 3 แสดงในรูปที่ 6 พบว่า คำตอบที่เหมาะสมมีราคาเท่ากับ 94,782 บาท โดยที่ค่าทางสถิติมีอัตราการน้อยลงสอดคล้องกับตัวอย่างที่ผ่านมา แต่มีอัตราการลดลงที่สูงมากกว่า โดยที่ราคาเฉลี่ยที่แสดงในรูปที่ 6 (ก) พบว่า การเลือกใช้ NF_{max} เท่ากับ 300 400 และ 500 บรรจบกันตั้งแต่ Itr_{max} เท่ากับ 100 ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 6 (ข) เช่นเดียวกัน ในตัวอย่างนี้ได้รับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0 ตั้งแต่เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบ t ในรูปที่ 6 (ค) มีความแตกต่างจากตัวอย่างที่ผ่านมา นั่นคือ ค่า t ทุกๆ NF_{max} และ Itr_{max} น้อยกว่าค่า t วิฤต จึงทำให้ทุกค่ายอมรับสมมติฐานหลัก H_0 คือ ผลการออกแบบของคำตอบที่เหมาะสมไม่มีความแตกต่างจากราคาเฉลี่ย ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ในตัวอย่างนี้สามารถเลือกใช้ค่าใดก็ได้ในการออกแบบ



(ก) ราคาเฉลี่ย

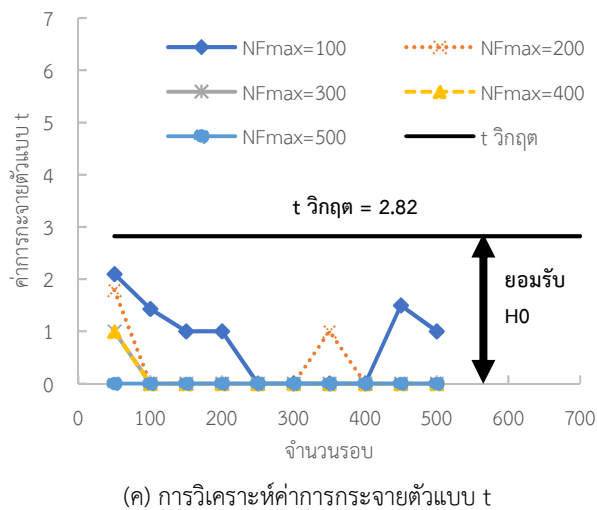
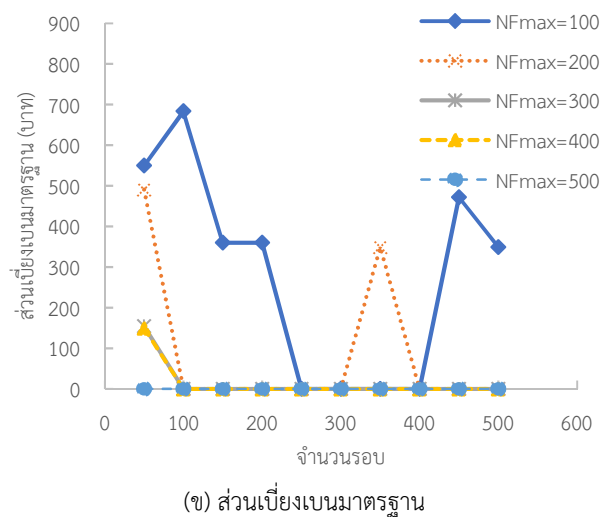
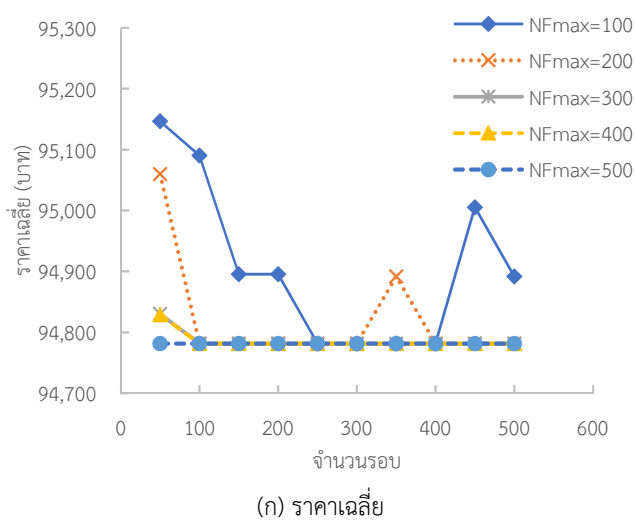


(ข) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



(ค) การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวแบบ t

รูปที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 6 ผลการทดสอบทางสถิติของตัวอย่างที่ 3

จากการเลือกใช้ค่า NF_{max} และ Itr_{max} ที่แตกต่างกันในทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่าค่าดังกล่าวสูงกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ [10, 11] อย่างมาก ซึ่งเกิดจากความซับซ้อนและขอบเขตของการออกแบบคานกลไกในงานวิจัยนี้ รวมถึงจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบมีมากกว่าการออกแบบฐานรากและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ส่งผลให้ FA ต้องทำการประมวลผลและปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนชนิดของโครงสร้างมีผลต่อการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ในขณะเดียวกัน ผลการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาในแง่ของความสามารถในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีความประหยัดยมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบเดิมอีกด้วย

5.2 การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสม

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการออกแบบที่เหมาะสมของ FA และวิธีการออกแบบทั่วไป [15] โดยเปรียบเทียบในส่วนของกำลังของวัสดุ ปริมาณการเสริมเหล็ก และราคาค่าก่อสร้าง ซึ่งผลการออกแบบของวิธีทั่วไปในตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 มีราคาเท่ากับ 46,907 92,928 และ 105,567 บาท ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบกับ FA พบว่า FA มีความประหยัดยมากกว่าในทุกตัวอย่างร้อยละ 2.79 15.28 และ 10.21 ตามลำดับ ที่มาของความประหยัดยนี้มากจากการที่ FA เลือกใช้กำลังอัดคอนกรีตที่ต่ำกว่าจึงส่งผลให้ราคาของโครงสร้างคอนกรีตมีความประหยัดยมากกว่าทุกตัวอย่าง และการเลือกใช้กำลังของเหล็กเสริมที่สูงกว่าทำให้ปริมาณการเสริมเหล็กน้อยกว่าในตัวอย่างที่ 2 และ 3 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในตัวอย่างที่ 1 พบว่า FA ได้เลือกใช้ค่า f_c ที่ต่ำที่สุด เนื่องจาก FA ได้คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบแล้วว่าโครงสร้างยังคงสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยอยู่ แต่ในการใช้งานจริงหากมีความจำเป็นต้องเลือกใช้ f_c ต่ำ ควรคำนึงถึงการเสีรฐรูปหรือการแอ่นตัวเพิ่มเติม

6. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของจำนวนหึ่งห้อยและจำนวนการทำซ้ำต่อของวิธีค้นหาแบบหึ่งห้อยสำหรับออกแบบที่เหมาะสมของคานกลไกคอนกรีตเสริมเหล็ก โดย

กำหนดใช้ราคาค่าก่อสร้างที่ประหยัดที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งผลการทดลองพบว่า จำนวนหิ่งห้อยและจำนวนการทำซ้ำมีผลกระทบโดยตรงต่อการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมของ FA ซึ่งคำแนะนำในการใช้งานคือ จำนวนหิ่งห้อยตั้งแต่ 400 และจำนวนการทำซ้ำตั้งแต่ 250 เป็นต้นไปจะส่งผลให้ได้รับราคาเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าการกระจายตัวแบบ t ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในทุกตัวอย่าง

นอกจากนี้ ในบางค่าพารามิเตอร์ได้รับผลของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0 หมายความว่า FA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้เท่าเดิมทุกครั้งที่ออกแบบ และสุดท้าย ผลการออกแบบที่เหมาะสมของ FA ยังมีความประหยัดมากกว่าวิธีการออกแบบอื่นที่ถูกนำมาเปรียบเทียบอยู่ในช่วงร้อยละ 2.79 - 15.28

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบที่เหมาะสม

ตัวแปรออกแบบ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3	
	FA	วิธีออกแบบทั่วไป [15]	FA	วิธีออกแบบทั่วไป [15]	FA	วิธีออกแบบทั่วไป [15]
f_c (กก./ชม. ²)	140	210	300	420	320	420
f_y (กก./ชม. ²)	5,000	4,000	5,000	4,000	5,000	4,000
เหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด	3 – DB32	10 – DB16	34 – DB16	18 – DB25	15 – DB20	12 – DB25
A_s (ชม. ²)	24.13	20.10	68.36	88.35	47.12	58.9
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวตั้ง	DB10@40	DB10@45	DB10@40	DB12@30	DB10@40	DB12@46
A_v (ชม. ²)	3.92	3.49	3.92	4.54	3.92	4.95
เหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอน	DB10@40	DB12@45	DB10@35	DB16@30	DB10@40	DB12@27
A_{vh} (ชม. ²)	3.92	5.03	4.49	13.40	3.92	8.47
ราคาก่อสร้าง (บาท)	45,596	46,907	78,727	92,928	94,782	105,564
ร้อยละความแตกต่าง	2.79		15.28		10.21	

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang X. Firefly algorithms for multimodal optimization. *Stochastic algorithms: foundations and applications. Lecture Notes in Computer Science*. 2009;5792(1): 169-178.
- [2] Yu S, Yang S, Su S. Self-adaptive step firefly algorithm. *Journal of Applied Mathematics*. 2013;2013(1): 1-8.
- [3] Apostolopoulos T, Vlachos A. Application of the firefly algorithm for solving the economic emissions load dispatch problem. *International Journal of Combinatorics*. 2011;2011(1): 1-24.
- [4] Balachennaiah P, Suryakalavathi M, Nagendra P. Firefly algorithm-based solution to minimize the real power loss in a power system. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018;9(1): 89-100.
- [5] Srivatsava P, Mallikarjun B, Yang X. Optimal test sequence generation using firefly algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2013;8(1): 44-53.
- [6] Kumbharana S, Pandey G. Solving travelling salesman problem using firefly algorithm. *International Journal for Research in Science and Advanced Technologies*. 2013;2(2): 53-57.

- [7] Dorigo M, Gambardella L. Ant colonies for the traveling salesman problem. *Biosystems*. 1997;43(2): 73-81.
- [8] Horn M. Vector quantization using the firefly algorithm for image compression. *Expert Systems with Applications*. 2012;39(1): 1078-1091.
- [9] Gao M, He X, Luo D, Jiang J, Teng Q. Object tracking using firefly algorithm. *IET Computer Vision*. 2013;7(4): 227-237.
- [10] Tapao A, Cheerarot R. Optimum design of reinforced concrete foundation by firefly algorithm. *Engineering Journal of research and development*. 2019;30(4): 133-145.
- [11] Tapao A, Cheerarot R. Optimum design of reinforced concrete structures by firefly algorithm. *The Journal of KMUTNB*. 2022;32(3): 598-608.
- [12] Tapao A, Cheerarot R. Optimum design of reinforced concrete deep beams using bat algorithm. *Engineering Journal of Research and Development*. 2021;32(4): 29-41.
- [13] Engineering Institute of Thailand. *Standard of Reinforced Concrete Building, Strength Design Method (E.I.T. 1008-38)*. Bangkok: Engineering Institute of Thailand Publishing; 2015.
- [14] Committee of Construction Price. *Labor Account/Operation for Estimate and Calculate Price (revised edition) Year 2022*. Bangkok: Committee of Construction Publishing; 2022.
- [15] Kong FK. *Reinforced Concrete Deep Beams*. New York: Taylor & Francis e-Library Publishing; 2002.