



การออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีค้นหาแบบหิ่งห้อย  
OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE FOUNDATION BY FIREFLY ALGORITHM

อัสนัย ทาเป้า<sup>1</sup> และเรืองรุชดี ชีระโรจน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น  
อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000 โทร: 088-795-7260, Email: assanai.tapao@gmail.com

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150  
โทร: 086-455-5981, Email: raungrut.c@msu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีค้นหาแบบหิ่งห้อยสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อให้มีราคาประหยัดที่สุด ซึ่งกำหนดให้ราคาค่าก่อสร้างรวมเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สำหรับขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมถูกสร้างขึ้นโดยใช้ภาษา Visual basic และใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลังในการออกแบบโครงสร้าง จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพของวิธีค้นหาแบบหิ่งห้อยจากตัวอย่างทดสอบจำนวน 4 ตัวอย่าง จากผลการศึกษาพบว่า วิธีค้นหาแบบหิ่งห้อยสามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กได้ นอกจากนี้ การเลือกใช้จำนวนหิ่งห้อยเท่ากับ 200 ตัว และจำนวนรอบสูงสุดเท่ากับ 100 รอบ ได้รับผลการทดสอบที่มีค่าทางสถิติดีที่สุด ยิ่งกว่านั้น ผลการออกแบบที่เหมาะสมของวิธีค้นหาแบบหิ่งห้อยมีความประหยัดมากกว่าวิธีดั้งเดิมร้อยละ 26.9

**คำสำคัญ:** ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีค้นหาแบบหิ่งห้อย การออกแบบที่เหมาะสม

ABSTRACT

*This research presents the application of firefly algorithm for the optimum design of reinforced concrete foundations for the minimum cost. The total cost of reinforced concrete foundations is used as the objective function and the optimum design process is created using Visual basic language and using the strength design method of E.I.T. (E.I.T.1008-38). Four design examples are used to evaluate the performance of firefly algorithm. From the result, it showed that the firefly algorithm can be applied for the optimum design of reinforced concrete foundations. In addition, the using firefly population of 200 and maximum iterations of 100 times obtain the best statistical results. Moreover, the optimum solution of firefly algorithm has economical more than the traditional method about 26.9 %.*

**KEYWORDS:** reinforced concrete foundations, firefly algorithm, optimum design

## 1. บทนำ

วิธีค้นหาแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm : FA) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมแบบฝูง (Swarm intelligence) ที่ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Yang [1] ในปี ค.ศ. 2009 ซึ่งเป็นวิธีการเลียนแบบพฤติกรรมของฝูงหิ่งห้อยที่บินในท้องฟ้าช่วงฤดูร้อนมาจำลองสำหรับใช้แก้ปัญหาที่เหมาะสม (Optimization problem) โดยหิ่งห้อยจะมีพฤติกรรมการปล่อยแสงกระพริบอย่างมีจังหวะเพื่อเป็นการส่งสัญญาณสำหรับการหาคู่ ซึ่งในเวลาต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้งาน FA อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เช่น ในปี ค.ศ. 2011 Senthilnath และคณะ [2] ได้แสดงให้เห็นว่า FA มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาฟังก์ชันมาตรฐาน (Benchmark function) ที่ดีกว่าวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (Artificial bee colony algorithm : ABC) และวิธีฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization : PSO) ในปีเดียวกัน Gandomi และคณะ [3] ทดลองใช้ FA กับการแก้ปัญหาพื้นฐานทางวิศวกรรมหลายๆ ปัญหา ซึ่งผลการทดลองพบว่า FA มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีเมตาฮิวริสติกอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 Hornig [4] ใช้ FA ในการจัดเรียงลำดับของเวกเตอร์สำหรับงานบีบอัดภาพ (Image compression) ซึ่งพบว่า FA มีความเร็วในการบีบอัดภาพมากกว่าเมตาฮิวริสติกแบบอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ ในปี ค.ศ. 2013 Srivatsava และคณะ [5] ประยุกต์ใช้ FA เพื่อแก้ปัญหาการกำหนดลำดับและเส้นทางการทดสอบสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์ (Test path and sequence generation) โดยพบว่า FA ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในทุกเส้นทาง ในปี ค.ศ. 2014 Debbarma และคณะ [6] ได้แสดงให้เห็นว่า FA สามารถสุ่มเลือกพารามิเตอร์ในระบบระบายความร้อนในพื้นที่ที่ไม่เท่ากันสามระบบ (Three unequal area thermal systems) ได้อย่างเหมาะสม ในปี ค.ศ. 2015 Ma และคณะ [7] ทดลองใช้ FA เพื่อการวิเคราะห์ความสามารถในการนำทางของแผนที่ระบบแม่เหล็ก (Magnetic map) โดยเปรียบเทียบกับ PSO และ DEA (Differential evolution algorithm) ซึ่งผลการทดลองพบว่า FA ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการนำทางที่ต่ำกว่าวิธีการที่เปรียบเทียบ ในปี ค.ศ. 2016 Balachennaiah และคณะ [8] แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ FA ในการควบคุมความเสถียรและการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของระบบการส่งไฟฟ้าผ่านเครือข่ายขนาดใหญ่ (Large transmission network) ที่ดีกว่าวิธีการที่เปรียบเทียบ ในปี ค.ศ. 2017 Chaurasia และคณะ [9] ประยุกต์ใช้ FA ให้สามารถออกแบบระบบควบคุมพลังงานลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า FA สามารถนำมาใช้ออกแบบได้โดยสามารถควบคุมระบบภายใต้สภาวะต่างๆ ได้ดี และล่าสุดในปี ค.ศ. 2018 Patle และคณะ [10] ทดลองใช้ FA ควบคุมเส้นทางการเดินของหุ่นยนต์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง ผลการทดลองพบว่า หุ่นยนต์ FA สามารถเลือกเส้นทางที่เหมาะสม สามารถหลบสิ่งกีดขวางและเดินทางไปยังเป้าหมายได้สำเร็จ เป็นต้น

จากงานวิจัยในช่วงที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า FA เป็นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาที่เหมาะสมได้อย่างหลากหลายและมีประสิทธิภาพวิธีการหนึ่ง แต่ยังไม่พบว่า มีการประยุกต์ใช้ FA สำหรับแก้ไขปัญหาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำ FA มาประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กตามข้อกำหนดการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยวิธีกำลัง (ว.ส.ท.1008-38) [11]

## 2. ข้อกำหนดการออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

มาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008-38 วิธีกำลัง [11] ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการออกแบบฐานรากเพื่อรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่เกิดจากการถ่ายน้ำหนักของตัวอาคารไว้ดังนี้

1) กำลังรับแรงตามแนวแกนของฐานรากที่คูณค่าลดกำลัง ( $\phi P_n$ ) ต้องมีค่ามากกว่าแรงตามแนวแกนประลัยที่กระทำ ( $P_u$ ) โดยที่ กำลังรับแรงตามแนวแกนของฐานรากนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดฐานรากและกำลังรับน้ำหนักของดิน แต่ในฐานรากลึกจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเสาเข็ม

- 2) กำลังรับโมเมนต์คดที่คูลค่าคดกำลังของฐานราก ( $\phi M_n$ ) จะต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์คดประลัยที่กระทำ ( $M_u$ )
- 3) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กชั้นต่ำกำหนดให้เท่ากับ 7.5 ซม.
- 4) ค่าความลึกของฐานรากเหนือเหล็กเสริมต้องมีค่าน้อยที่สุด 15 ซม. สำหรับฐานรากตื้น และอย่างน้อย 30 ซม. สำหรับฐานรากลึก
- 5) ปริมาณเหล็กเสริมในฐานราก ( $A_s$ ) จะต้องมีค่ามากกว่าปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำตามสมการที่ (1) แต่ต้องไม่เกินปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดที่ยอมให้ตามสมการที่ (2)

$$A_{s,min} = \frac{14}{f_y} bd \quad (1)$$

$$A_{s,max} = 0.75 \times \left( \frac{0.85\beta_1 f'_c \times 6120}{f_y(6120 + f_y)} \right) bd \quad (2)$$

เมื่อ  $A_{s,min}$  คือ ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำ  $f_y$  คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม  $b$  คือ ด้านแคบของฐานราก  $d$  คือ ค่าความลึกประสิทธิภาพ  $A_{s,max}$  คือ ปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดที่ยอมให้  $f'_c$  คือ กำลังอัดของคอนกรีต  $\beta_1$  คือ ค่าตัวคูณประกอบตามมาตรฐานการออกแบบซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) โดยจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.65

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left( \frac{f'_c - 280}{70} \right) \geq 0.65 \quad (3)$$

- 6) ค่าแรงเฉือนทะลุที่เกิดขึ้นในฐานราก ( $v_p$ ) จะต้องมีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนทะลุที่ยอมให้ ( $\phi v_{p,allow}$ ) ตามสมการที่ (4)

$$v_p \leq \phi v_{p,allow} = \phi 1.06 \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

- 7) กำลังรับแรงเฉือนแบบคาน ( $v_b$ ) จะต้องมีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้ ( $\phi v_{b,allow}$ ) ตามสมการที่ (5)

$$v_b \leq \phi v_{b,allow} = \phi 0.53 \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

- 8) ระยะห่างของเสาเข็มในฐานรากสำหรับฐานรากลึกจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเสาเข็มที่ถูกเลือกไว้
- 9) ตัวคูณลดกำลัง  $\phi$  สำหรับ โมเมนต์คดกำหนดให้เท่ากับ 0.9 ส่วนกำลังรับแรงเฉือนทะลุและแรงเฉือนแบบคาน เท่ากับ 0.85

### 3. วิธีค้นหาแบบหึ่งห้อย

ขั้นตอนการทำงานของ FA มีลำดับดังรูปที่ 1 โดยเริ่มต้นจากการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาที่เลือก จากนั้นกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับหึ่งห้อยแต่ละตัวด้วยการสุ่ม ต่อมา หึ่งห้อยแต่ละตัวจะถูกกำหนดความเข้มของแสงที่กระพริบตามฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหา [12] ในระหว่างกระบวนการแก้ปัญหาจะมีการเปรียบเทียบค่าความเข้มของแสงหึ่งห้อยในทุกรอบการทำงาน หึ่งห้อยที่มีความเข้มแสงต่ำจะเคลื่อนที่ไปทางหึ่งห้อยที่มีความเข้มแสงที่สูงกว่าโดยที่ระยะทางการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับค่าความน่าดึงดูด จากนั้น เมื่อหึ่งห้อยเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่แล้ว จึงเริ่มการประเมินสถานะและปรับปรุงค่าความเข้มของแสง ต่อมาคือการเปรียบเทียบความน่าอยู่ของตำแหน่งใหม่กับตำแหน่งเดิมว่ามีความน่าอยู่มากน้อยเพียงใด ซึ่งตัวมันเองต้องตัดสินใจว่าควรไปยังตำแหน่งใหม่หรือควรเดินทางกลับไปยังตำแหน่งเดิม โดยกระบวนการเหล่านี้จะทำให้ชัดเจนกว่าการทำงานมีความสอดคล้องกับเงื่อนไขการหยุด ซึ่งแต่ละขั้นตอนได้อธิบายไว้ในส่วนย่อยดังต่อไปนี้

```

เริ่มต้นวิธีการค้นหาแบบหึ่งห้อย
กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา (Objective function)
กำหนดตำแหน่งหึ่งห้อยเริ่มต้นด้วยการสุ่มและกำหนดรอบการทำงานเป็นรอบที่ 1
ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของหึ่งห้อยทุกตัว
เริ่มการทำซ้ำเมื่อ จำนวนรอบปัจจุบัน <= จำนวนรอบสูงสุดที่ได้กำหนดไว้
{
    จำนวนรอบปัจจุบัน + 1
    ทำซ้ำค่า  $i = 1$  ถึง จำนวนหึ่งห้อยสูงสุด
    {
        ทำซ้ำค่า  $j = 1$  ถึง จำนวนหึ่งห้อยสูงสุด
        {
            ถ้า  $i > j$  ให้ทำดังต่อไปนี้
            {
                หึ่งห้อย  $i$  เคลื่อนที่ไปยังหึ่งห้อย  $j$ 
                โดยพิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวเองและหึ่งห้อย  $j$ 
                และความน่าดึงดูดของหึ่งห้อย  $j$ 
                ประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งใหม่
            }
        }
    }
    ปรับปรุงตำแหน่งปัจจุบันเมื่อตำแหน่งใหม่ดีกว่า
}
แสดงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในรอบปัจจุบัน
จบการทำงาน
    
```

รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของ FA ในรูปแบบของรหัสเทียม

### 3.1 การกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้กับประชากรหิ่งห้อย

เริ่มต้นการทำงานด้วยการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้หิ่งห้อยแต่ละตัวด้วยการสุ่มแบบวงกว้างในแต่ละตัวแปรออกแบบของหิ่งห้อยแต่ละตัวตามสมการที่ (6) จากนั้น หิ่งห้อยทุกตัวจะได้รับการประเมินตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาที่ถูกกำหนดขึ้น

$$x_i = x_{i,\min} + \text{rand}(0,1) \times (x_{i,\max} - x_{i,\min}) \quad (6)$$

เมื่อ  $x_i$  คือ ตำแหน่งปัจจุบันของหิ่งห้อย  $x_{i,\min}$  คือ ตัวแปรออกแบบที่มีค่าน้อยที่สุด  $\text{rand}(0,1)$  คือ ค่าสุ่มที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และ  $x_{i,\max}$  คือ ตัวแปรออกแบบที่มีค่ามากที่สุด

### 3.2 การเคลื่อนย้ายไปยังตำแหน่งใหม่

การเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ของหิ่งห้อยจะพิจารณาจากตำแหน่งเดิม อัตราค่าการดึงดูดหิ่งห้อยตัวอื่น ( $\beta_0$ ) และระยะห่างระหว่างหิ่งห้อยตามสมการที่ (7)

$$x_i(t+1) = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \left( \text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

เมื่อ  $x_i(t+1)$  คือ ตำแหน่งใหม่ของหิ่งห้อย  $x_i$  คือ ตำแหน่งเดิมของหิ่งห้อย  $x_j$  คือ ตำแหน่งของหิ่งห้อยใกล้เคียง  $\alpha$  คือ ค่าจำนวนใดๆ ที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1  $\text{rand}$  คือ ค่าสุ่มที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่า  $\gamma$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดึงดูดด้วยแสงซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และ  $r_{ij}$  คือ ระยะห่างระหว่างหิ่งห้อยสองตัว

### 3.3 การพิจารณาระยะห่างของหิ่งห้อย

ระยะห่างระหว่างหิ่งห้อย 2 ตัว จะถูกกำหนดให้อยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian distance) ตามสมการที่ (8)

$$r_{ij} = \|x_j - x_i\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (8)$$

### 3.4 ความน่าดึงดูดระหว่างหิ่งห้อย

ค่าความน่าดึงดูดจะทำให้หิ่งห้อยที่มีความสว่างน้อยมีการเคลื่อนที่ไปยังหิ่งห้อยที่สว่างมากกว่า แต่ถ้าหากว่าไม่มีหิ่งห้อยที่มีความสว่างมากกว่า มันจะเคลื่อนที่แบบสุ่ม ค่าความน่าดึงดูดนี้เป็นค่าสัดส่วน โดยตรงกับค่าความสว่างของหิ่งห้อย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$\beta_r = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (9)$$

#### 4. การเขียนโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสม

##### 4.1 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรมและราคาที่ใช้สำหรับออกแบบที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ได้เขียน โปรแกรม FA โดยใช้ภาษาวิซวลเบสิก (Visual basic) ภายใต้อุปกรณ์ไมโครคอมพิวเตอร์ Intel core i7-4500U ความเร็ว 1.80 GHz หน่วยความจำแรม 8 GB ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 7 แบบ 64 บิต และมีขอบเขตการทำงานตามตารางที่ 1 ประกอบด้วย  $f_c$  ที่เลือกได้เท่ากับ 140 180 210 240 280 300 320 และ 350 กก./ชม.<sup>2</sup>  $f_y$  ที่เลือกได้เท่ากับ 3,000 4,000 และ 5,000 กก./ชม.<sup>2</sup> ขนาดของฐานรากมีตั้งแต่ขนาด 50x50 ซม. ถึง 400x400 ซม. โดยปรับเพิ่มครั้งละ 10 ซม. ความหนาตั้งแต่ 20 ซม. ถึง 200 ซม. โดยปรับเพิ่มครั้งละ 5 ซม. เหล็กเสริมคอนกรีตมีตั้งแต่ DB12 DB16 DB20 DB25 DB28 DB32 DB36 และ DB40 จำนวนเหล็กเสริมชั้นละ 5 เส้น ถึง 20 เส้น โดยปรับเพิ่มครั้งละ 1 เส้น เสาเข็มสี่เหลี่ยมตันขนาด 0.22x0.22 ม. 0.26x0.26 ม. 0.30x0.30 ม. และ 0.35x0.35 ซึ่งยาว 21 ม. โดยรับน้ำหนักปลอดภัยเท่ากับ 30 35 45 และ 50 ตัน และจำนวนเสาเข็มที่ออกแบบได้คือ 1 4 5 และ 9 ตัน

ตารางที่ 1 ขอบเขตการออกแบบของโปรแกรม FA

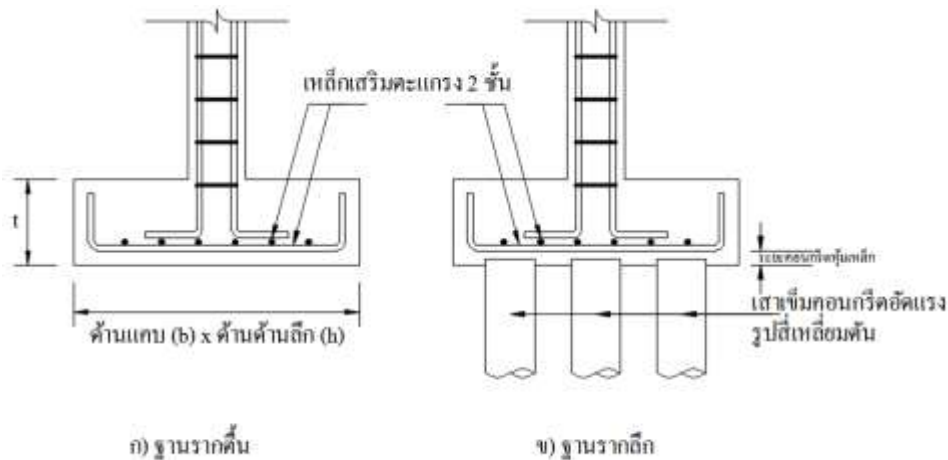
ตัวแปรออกแบบ	ชนิดฐานราก	ต่ำสุด	ปรับเพิ่มครั้งละ	ค่าสูงสุด	หน่วย
$f_c$	ทุกชนิด	140	-	350	กก./ชม. <sup>2</sup>
$f_y$	ทุกชนิด	3,000	1,000	5,000	กก./ชม. <sup>2</sup>
ด้านแคบ (b)	ทุกชนิด	50	10	400	ซม.
ด้านกว้าง (h)	ทุกชนิด	50	10	400	ซม.
ความหนา (t)	ทุกชนิด	20	5	200	ซม.
เหล็กเสริม	ทุกชนิด	DB12	-	DB40	-
จำนวนเหล็กเสริม	ทุกชนิด	5	1	20	เส้น
ขนาดเสาเข็ม	ฐานรากลึก	0.22	-	0.35	ม.
จำนวนเสาเข็ม	ฐานรากลึก	1	-	9	ตัน

รายละเอียดของขนาดและการเสริมเหล็กในฐานรากแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเท่ากับ ด้านแคบ (b) x ด้านลึก (h) x ความหนา (t) โดยมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 7.5 ซม. และมีการเสริมเหล็กรับแรงดัดเป็นเหล็กตะแกรง 2 ชั้น ซึ่งไม่พิจารณาเสริมเหล็กครอบ

##### 4.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ฟังก์ชันของราคาที่จะส่งผลให้ได้รับผลการออกแบบของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความประหยัดมากที่สุด โดยที่สมการที่ (10) ถูกกำหนดใช้สำหรับฐานรากตื้นและสมการที่ (11) ถูกกำหนดใช้สำหรับฐานรากลึก

$$F_{\text{cost}} = \text{Min} \sum M_C C_C + M_S C_S + M_F C_F \quad (10)$$



รูปที่ 2 รายละเอียดของฐานรากค้ำและฐานรากค้ำที่ใช้ในงานวิจัย

$$F_{cost} = \text{Min} \sum M_C C_C + M_S C_S + M_F C_F + M_P C_P \quad (11)$$

เมื่อ  $M_C$ ,  $M_S$ ,  $M_F$  และ  $M_P$  คือ ปริมาณของ คอนกรีต เหล็กเสริม แบบหล่อและจำนวนเสาเข็มตามลำดับ สำหรับ  $C_C$ ,  $C_S$ ,  $C_F$  และ  $C_P$  คือ ราคาของคอนกรีต เหล็กเสริม แบบหล่อและเสาเข็มตามลำดับ

ราคาวัสดุและค่าแรงสำหรับใช้คำนวณราคาฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในตารางที่ 2 ประกอบด้วยราคาคอนกรีตผสมเสร็จ ราคาแบบหล่อ เหล็กเสริม และเสาเข็มที่นำมาจากบัญชีค่าแรง/ค่านินการ สำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2560 [13] ซึ่งราคานี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมเพื่อให้สอดคล้องกับท้องถิ่น

#### 4.3 ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมของโปรแกรม FA

ลำดับขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมโดย FA แสดงในรูปที่ 3 มีขั้นตอนที่สำคัญ 5 ขั้นตอน โดยที่แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1) เริ่มต้นที่การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นซึ่งประกอบด้วย น้ำหนักที่กระทำ ( $P_u$  และ  $P_u$ ) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก และพารามิเตอร์ของ FA ซึ่งประกอบด้วย  $\alpha$ ,  $\beta_0$ ,  $\gamma$  จำนวนหึงห้อยสูงสุด ( $N_{max}$ ) และจำนวนรอบการทำงานสูงสุด ( $R_{max}$ )

2) การสร้างคำตอบเริ่มต้นในรอบที่ 1 ( $R = 1$ ) เป็นขั้นตอนการกำหนดกลุ่มคำตอบเริ่มต้นด้วยการสุ่มตัวแปรออกแบบอย่างกว้างตามสมการที่ (6) ให้กับแต่ละคำตอบ (คำตอบ 1 คำตอบ คือ หึงห้อย 1 ตัว) โดยทุกคำตอบจะถูกคำนวณกำลังรับน้ำหนักและราคาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้น ถึงจะเป็นการตรวจสอบการรับน้ำหนักและมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำซ้ำจนกว่าทุกคำตอบรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยและเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ จากนั้น ทำต่อขั้นตอนที่ 3

3) เริ่มพิจารณาสร้างคำตอบใหม่ ทุกคำตอบในรอบที่ผ่านมาได้มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรออกแบบด้วยการสุ่มโดยใช้สมการที่ (7) จากนั้น คำตอบใหม่จะถูกคำนวณกำลังรับน้ำหนักและราคาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์

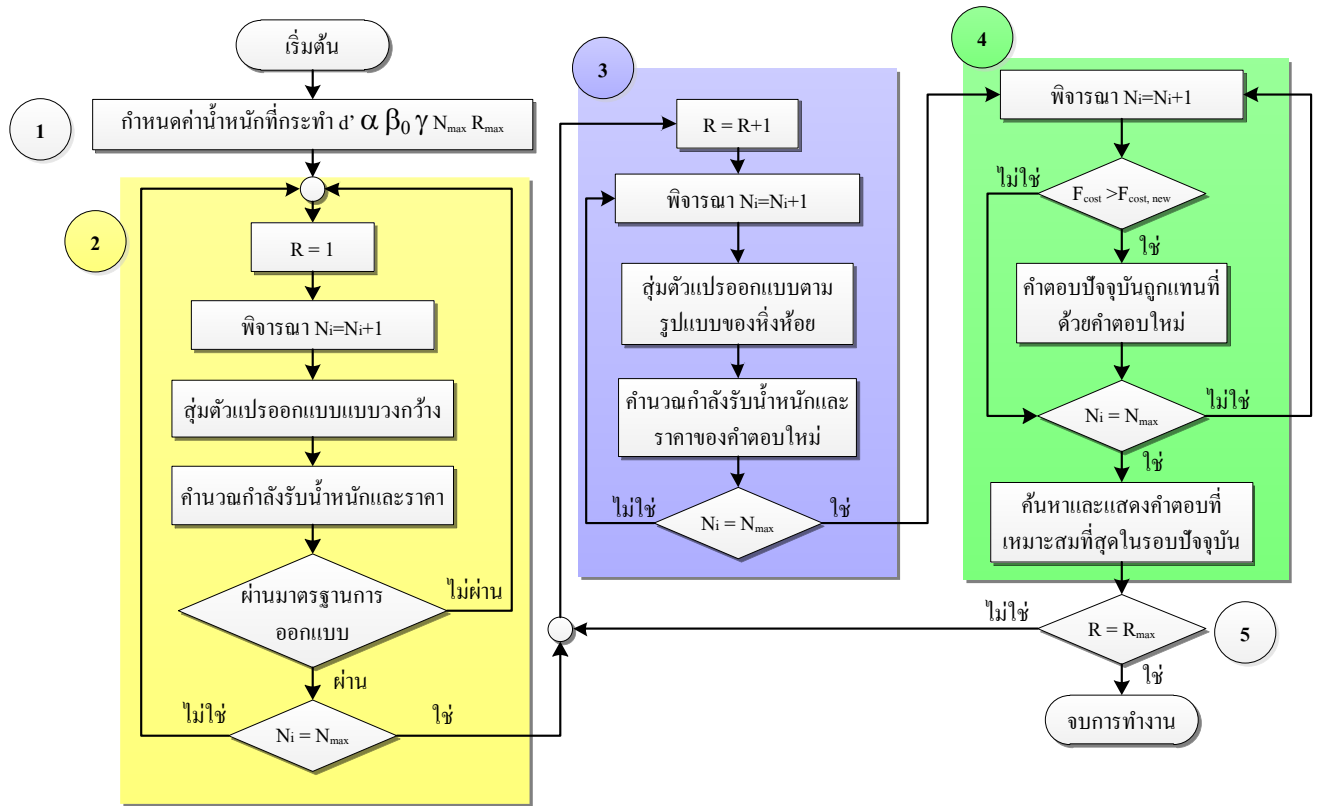
4) การแทนที่ เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบราคาของคำตอบใหม่ ( $F_{cost,new}$ ) กับราคาของคำตอบในรอบปัจจุบัน ( $F_{cost}$ ) ที่ละคำตอบโดยการจับคู่ ซึ่งถ้าหากคำตอบใหม่มีความประหยัดมากกว่าคำตอบปัจจุบัน สามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย และผ่านมาตรฐานการออกแบบ คำตอบเดิมจะถูกแทนที่ด้วยคำตอบใหม่ทันที

5) ตรวจสอบจำนวนรอบการทำงาน หากจำนวนรอบ  $n$  รอบปัจจุบันเท่ากับจำนวนรอบสูงสุด ( $R_{max}$ ) ที่กำหนดไว้ โปรแกรมจะหยุดการทำงานทันที แต่ถ้าไม่ใช่ให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 3

ตารางที่ 2 ราคาวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในงานวิจัย

รายการ	หน่วย	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ราคารวม
คอนกรีตผสมเสร็จและแบบหล่อ				
กำลังอัด 140 กก./ชม. <sup>2</sup>	บาท/ม. <sup>3</sup>	2,089.00	485	2,574.00
กำลังอัด 180 กก./ชม. <sup>2</sup>	บาท/ม. <sup>3</sup>	2,124.20	485	2,609.20
กำลังอัด 210 กก./ชม. <sup>2</sup>	บาท/ม. <sup>3</sup>	2,158.60	485	2,643.60
กำลังอัด 240 กก./ชม. <sup>2</sup>	บาท/ม. <sup>3</sup>	2,193.00	485	2,678.00
กำลังอัด 280 กก./ชม. <sup>2</sup>	บาท/ม. <sup>3</sup>	2,261.80	485	2,746.80
กำลังอัด 300 กก./ชม. <sup>2</sup>	บาท/ม. <sup>3</sup>	2,304.80	485	2,789.80
กำลังอัด 320 กก./ชม. <sup>2</sup>	บาท/ม. <sup>3</sup>	2,356.40	485	2,841.40
กำลังอัด 350 กก./ชม. <sup>2</sup>	บาท/ม. <sup>3</sup>	2,416.60	485	2,901.60
แบบหล่อคอนกรีต	บาท/ม. <sup>2</sup>	493	133	626.00
เหล็กเสริมคอนกรีต				
ระดับชั้น SD30	บาท/กก.	19	3.3	22.30
ระดับชั้น SD40	บาท/กก.	19.5	3.3	22.80
ระดับชั้น SD50	บาท/กก.	19.9	3.3	23.20
เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมตัน				
ขนาด 0.22x0.22 ยาว 21 ม.	บาท/ต้น	4,620.00	1,021	5,641.00
ขนาด 0.26x0.26 ยาว 21 ม.	บาท/ต้น	6,090.00	1,450	7,540.00
ขนาด 0.30x0.30 ยาว 21 ม.	บาท/ต้น	8,190.00	1,925	10,115.00
ขนาด 0.35x0.35 ยาว 21 ม.	บาท/ต้น	11,025.00	2,550	13,575.00





รูปที่ 3 ลำดับขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมของโปรแกรม FA

### 5. ตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็นฐานรากตื้นและฐานรากลึกอย่างละ 2 ตัวอย่างตามตารางที่ 3 โดยแต่ละตัวอย่างนำมาจากตัวอย่างการออกแบบที่ได้จากวิธีดั้งเดิม [14,15]

ตารางที่ 3 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่	1	2	3	4
ชนิดฐานราก	ฐานรากตื้น	ฐานรากตื้น	ฐานรากลึก	ฐานรากลึก
ตอม่อ (ชม.)	20 x 20	35 x 35	40 x 40	50 x 50
ระยะหุ้ม (ชม.)	7.5	7.5	7.5	7.5
P (กก.)	9,600	36,000	75,000	240,000
P <sub>u</sub> (กก.)	14,600	60,432	112,500	376,440
q <sub>u</sub> (กก./ม. <sup>2</sup> )	8,000	10,000	-	-

ในการใช้งานโปรแกรม FA ต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ  $N_{max}$ ,  $R_{max}$  ค่า  $\alpha$ ,  $\beta_0$  และ  $\gamma$  ตามลำดับ ดังนั้นการเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมจะทำให้ FA มีประสิทธิภาพต่อการแก้ปัญหาที่เหมาะสมสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับค่า  $N_{max}$  ตั้งแต่ 25 ถึง 250 ตัวและ  $R_{max}$  ตั้งแต่ 25 ถึง 150 รอบ เพื่อเลือกค่าที่เพียงพอต่อการนำไปใช้สำหรับออกแบบกับตัวอย่าง โดยกำหนดใช้  $\alpha$  เท่ากับ 0.2  $\beta_0$  เท่ากับ 1 และ  $\gamma$  เท่ากับ 0.4 เนื่องจากค่าเหล่านี้ให้ผลคำตอบที่ดีเมื่อทดสอบในห้องทดลอง จากนั้น ตัวอย่างที่ 1 จะถูกนำมาทดสอบสำหรับปรับค่า  $N_{max}$  และ  $R_{max}$  โดยทดสอบค่าละ 10 ครั้งเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติแล้วจึงเลือกค่าทางสถิติที่ดีที่สุดมาใช้ออกแบบกับตัวอย่างอื่นต่อไป

## 6. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบปรับค่า  $N_{max}$  โดยกำหนดใช้จำนวน  $R_{max}$  เท่ากับ 50 รอบ ทดสอบค่าละ 10 ครั้งแสดงในตารางที่ 4 พบว่า การเลือกใช้จำนวน  $N_{max}$  เท่ากับ 200 ให้ผลการทดสอบทางสถิติซึ่งได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน ค่าฐานนิยมและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ดีกว่าจำนวน  $N_{max}$  อื่น นอกจากนี้ การเลือกใช้  $N_{max}$  ที่มากกว่า 200 กลับส่งผลให้ค่าทางสถิติไม่ได้ดีขึ้นแต่อย่างใด ดังนั้นการกำหนดใช้  $N_{max}$  เท่ากับ 200 จึงเป็นค่าที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน โดยที่เวลาเฉลี่ยต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเลือกจำนวนหึ่งห้อยโดยใช้จำนวนรอบเท่ากับ 50 รอบ

จำนวนหึ่งห้อย ( $N_{max}$ )	25	50	100	150	200	250
เวลาเฉลี่ย (วินาที)	0.43	0.50	0.54	0.61	<b>0.58</b>	0.73
ราคาต่ำสุด	1,468	1,468	1,468	1,468	<b>1,468</b>	1,468
ราคาสูงสุด	2,668	1,548	1,548	1,498	<b>1,485</b>	1,498
ราคาเฉลี่ย	1,915	1,511	1,479	1,475	<b>1,470</b>	1,474
ค่ามัธยฐาน	1,619	1,523	1,468	1,468	<b>1,468</b>	1,468
ค่าฐานนิยม	1,578	1,548	1,468	1,468	<b>1,468</b>	1,468
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	487.90	39.64	25.81	12.55	<b>5.33</b>	12.71

ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อกำหนด  $R_{max}$  ตั้งแต่ 25 ถึง 150 รอบ ค่าละ 10 ครั้ง เมื่อกำหนดใช้  $N_{max}$  เท่ากับ 200 แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งพบว่า ค่าทางสถิติมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อเลือกใช้  $R_{max}$  เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เวลาเฉลี่ยต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ การเลือกใช้  $R_{max}$  ตั้งแต่ 75 ขึ้นไปพบว่า ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า FA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมทุกครั้งของการออกแบบ ดังนั้น ค่า  $R_{max}$  ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานคือ 75 แต่เพื่อเป็นการเพิ่มโอกาสต่อการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมให้มากขึ้น งานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่า  $R_{max}$  เท่ากับ 100 ในการทดสอบกับตัวอย่างอื่นๆ

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของโปรแกรม FA ทั้ง 4 ตัวอย่างเมื่อเลือกใช้  $N_{max}$  เท่ากับ 200 และ  $R_{max}$  เท่ากับ 100 แสดงในตารางที่ 6 พบว่า FA ออกแบบฐานรากที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณเหล็กเสริมที่ต่ำกว่าจึงได้รับผลการออกแบบที่ประหยัดมากกว่าวิธีดั้งเดิม [14, 15] ทุกตัวอย่างร้อยละ 38.4 30.7 7.5 และ 30.9 ตามลำดับ

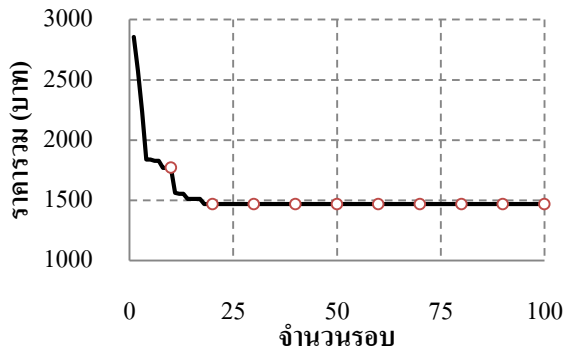
ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อกำหนดจำนวนรอบที่แตกต่างกัน

จำนวนรอบสูงสุด ( $R_{max}$ )	25	50	75	100	125	150
เวลาเฉลี่ย (วินาที)	0.30	0.58	1.00	1.33	1.48	1.94
ราคาต่ำสุด	1,468	1,468	1,468	1,468	1,468	1,468
ราคาสูงสุด	1,760	1,485	1,468	1,468	1,468	1,468
ราคาเฉลี่ย	1,542	1,470	1,468	1,468	1,468	1,468
ค่ามัธยฐาน	1,498	1,468	1,468	1,468	1,468	1,468
ค่าฐานนิยม	1,498	1,468	1,468	1,468	1,468	1,468
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	84.99	5.33	0	0	0	0

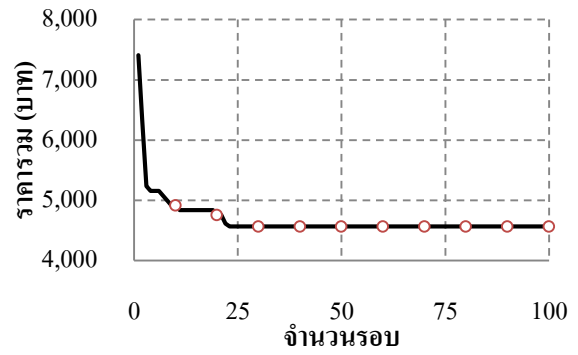
ตารางที่ 6 ผลการออกแบบที่เหมาะสมของ FA

ตัวอย่างที่	1		2		3		4	
	วิธีดั้งเดิม	FA	วิธีดั้งเดิม	FA	วิธีดั้งเดิม	FA	วิธีดั้งเดิม	FA
ตัวอย่างที่	[14]		[14]		[15]		[15]	
$f_c$ (กก./ชม. <sup>2</sup> )	200	140	240	300	250	320	240	300
$f_y$ (กก./ชม. <sup>2</sup> )	3,000	5,000	3,000	5,000	3,000	5,000	3,000	5,000
b (ชม.)	150	110	200	190	150	130	230	200
h (ชม.)	150	110	200	190	150	130	230	200
t (ชม.)	20	20	30	25	50	45	80	65
ขนาดเหล็ก	6-DB12#	5-DB12#	7-DB20#	5-DB16#	8-DB20#	7-DB16#	17-DB25#	17-DB16#
$A_s$ (ชม. <sup>2</sup> )	6.78	5.65	21.99	10.05	25.13	14.07	83.45	34.18
ขนาดเสาเข็ม	-	-	-	-	0.22x21 ม.	0.22x21 ม.	0.35x21 ม.	0.22x21 ม.
จำนวนเสาเข็ม	-	-	-	-	4	4	5	9
ราคารวม (บาท)	2,384	1,468	6,591	4,565	29,385	27,182	94,066	64,978
ความต่าง (%)	38.4		30.7		7.5		30.9	

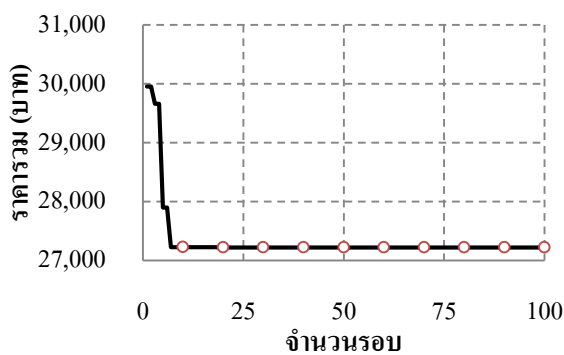
สำหรับลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของ FA ทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีลักษณะการลู่เข้าในช่วงแรกที่เร็วมากคล้ายกับการตกเขาแล้วจึงมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงปลายเมื่อไม่สามารถพบกับคำตอบที่เหมาะสมกว่า โดยจากรูปที่ 4 พบว่า FA สามารถค้นพบกับคำตอบที่เหมาะสมประมาณรอบที่ 25



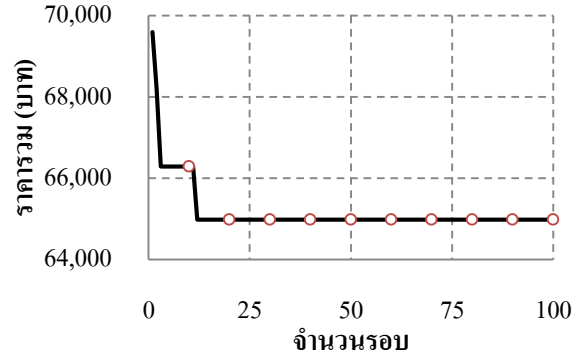
ก) ตัวอย่างที่ 1



ข) ตัวอย่างที่ 2



ค) ตัวอย่างที่ 3



ง) ตัวอย่างที่ 4

รูปที่ 4 ลักษณะการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของ FA

## 7. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ FA สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยกำหนดค่าใช้จ่ายความเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $N_{max}$  และ  $R_{max}$  ก่อนการใช้งาน จากนั้น เลือกใช้ค่าที่เหมาะสมทดลองออกแบบกับตัวอย่างฐานรากดินและฐานรากเสาเข็ม ซึ่งผลการทดลองพบว่า FA สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กได้ โดยที่การเลือกใช้จำนวน  $N_{max}$  และ  $R_{max}$  เท่ากับ 200 และ 100 ให้ผลการทดสอบทางสถิติที่ดีกว่าค่าอื่น นอกจากนี้ ผลการออกแบบที่เหมาะสมของ FA ได้รับฐานรากที่มีขนาดและปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าวิธีดั้งเดิม [14,15] ทำให้ผลการออกแบบมีความประหยัดมากกว่าทุกตัวอย่างโดยเฉลี่ยร้อยละ 26.9

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang, XS. Firefly algorithms for multimodal optimization. *Lecture Notes in Computer Sciences*, 2009, 5792 (1), pp. 169-178.
- [2] Senthilnath, J. *et al.* Clustering using firefly algorithm: Performance study. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2011, 1 (3), pp. 164-171.
- [3] Gandomi, AH. Mixed variable structural optimization using firefly algorithm. *Computers and Structures*, 2011, 89 (23-24), pp. 2325-2336.

- 
- [4] Horng, MH. Vector quantization using the firefly algorithm for image compression. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39 (1), pp. 1078–1091.
- [5] Srivatsava, PR. *et al.* Optimal test sequence generation using firefly algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2013, 8 (1), pp. 44–53.
- [6] Debbarma, S. *et al.* Solution to automatic generation control problem using firefly algorithm optimized  $I^{\lambda}D^m$  controller. *ISA Transactions*, 2014, 53 (2), pp. 358–366.
- [7] Ma, Y. *et al.* Navigability analysis of magnetic map with projecting pursuit-based selection method by using firefly algorithm. *Neurocomputing*, 2015, 159 (1), pp. 288–297.
- [8] Balachennaiah, P. *et al.* Optimizing real power loss and voltage stability limit of a large transmission network using firefly algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2016, 19 (2), pp. 800–810.
- [9] Chaurasia, GS. A meta-heuristic firefly algorithm based smart control strategy and analysis of a grid connected hybrid photovoltaic/wind distributed generation system. *Solar Energy*, 2017, 150 (1), pp. 265–274.
- [10] Patle, BK. Path planning in uncertain environment by using firefly algorithm. *Defence Technology*, 2018, 14 (6), pp. 691–701.
- [11] Engineering Institute of Thailand. *Standard of reinforced concrete building, strength design method (E.I.T. 1 0 0 8 -3 8)*, 9th ed. Bangkok: Engineering Institute of Thailand, 2015.
- [12] Sheikholeslami, R. *et al.* Optimum cost design of reinforced concrete retaining walls using hybrid firefly algorithm. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 2014, 6 (6), pp. 465–470.
- [13] Committee of construction price. *Labor account/operation for estimate and calculate price (revised edition) year 2017*, 1<sup>st</sup> ed. Bangkok, 2017.
- [14] Chovichien, V. *Reinforced Concrete Design (Strength Design Method: SMD)*, 5th ed. Bangkok: Newthaimit, 2011.
- [15] Rukzon, S. *Reinforced Concrete Structure Design: Strength and Working Design Method*, 6th. Nonthaburi: Angle of sci, 2014.