

การออกแบบที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดร่วมกับโมเมนต์บิด โดยใช้ขั้นตอนวิธีจิงโจ้น้ำ

อัศนัย ทาภา^{1*} และ เรืองรุชดี ชีระโรจน์²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดร่วมกับโมเมนต์บิดโดยใช้วิธีจิงโจ้น้ำ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการออกแบบคานที่มีความประหยัดและสอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบของ ACI318-11 การศึกษาครั้งนี้ได้สร้างขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมขึ้นโดยใช้ Microsoft Visual Studio 2019 และประเมินประสิทธิภาพการออกแบบกับตัวอย่างคานจำนวน 3 ตัวอย่าง ผลการทดลองพบว่า วิธีจิงโจ้น้ำสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดร่วมกับโมเมนต์บิดได้ ซึ่งผลการออกแบบมีความประหยัดกว่าวิธีการออกแบบทั่วไปเฉลี่ยร้อยละ 21.4 นอกจากนี้ การเลือกใช้จำนวนรอบสูงสุดเท่ากับ 350 รอบและจำนวนจิงโจ้น้ำสูงสุด 300 ตัว ได้รับผลการทดสอบทางสถิติที่ดีที่สุดในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก; การออกแบบที่เหมาะสม; โมเมนต์บิด; โมเมนต์ดัด; วิธีจิงโจ้น้ำ

รับพิจารณา: 21 มีนาคม 2565

แก้ไข: 21 เมษายน 2565

ตอบรับ: 17 พฤษภาคม 2565

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

² รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: assanai.tapao@gmail.com

Optimum Design of Reinforced Concrete Beams for Bending Moment and Torsion using Water Strider Algorithm

Assanai Tapao^{1*} and Raungrut Cheerarot²

Abstract

This research presents the optimal design of torsional reinforced concrete beams for bending moment and torsion using a water strider algorithm. The objective of the research is to design a beam that is economical and according to ACI318-11 standard. This study establishes the optimal design process using Microsoft Visual Studio 2019 and evaluates the performance with three samples of beams. The results showed that the water strider algorithm can apply for the optimum design of reinforced concrete beams for bending moment and torsion, which the design results have more economic than the conventional method by 21.4 %. In addition, the selection of the maximum number of iterations is 350 and the maximum number of water striders is 300 individuals obtain best statistical results in reinforced concrete beam design.

Keywords: reinforced concrete beam design; optimum design; torsion; bending; water strider algorithm

Received: March 21, 2022

Revised: April 21, 2022

Accepted: May 17, 2022

¹ Assistant Professor, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

² Associate Professor, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

* Corresponding Author, e-mail: assanai.tapao@gmail.com

1. บทนำ

ขั้นตอนวิธีจิงโจ้น้ำ (Water strider algorithm: WSA) คือ วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมวิธีการหนึ่งที่กำลังมาจากระบบการใช้ชีวิตตามธรรมชาติของจิงโจ้น้ำ ด้วยความที่มันมีขนาดเล็กจึงทำให้มันสามารถอาศัยอยู่บนผิวน้ำได้ด้วยแรงตึงผิวของน้ำ และด้วยขนาดเล็กลทำให้พวกมันเดินอยู่บนผิวน้ำได้ ระหว่างช่วงชีวิตจะเกิดกลไกของการเคลื่อนไหว การสื่อสาร และกลุ่มอาการทางพฤติกรรมเป็นลักษณะเฉพาะอื่น ๆ ของพวกมัน [1] วิธี การนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Kaveh และคณะในปี ค.ศ. 2020 [2] โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการแก้ปัญหาที่เหมาะสมของฟังก์ชันมาตรฐาน (Benchmark function) จำนวน 44 ฟังก์ชัน [3] และการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมหลายปัญหา เช่น ปัญหาการออกแบบคานเชื่อม (Welded beam design) [4] ปัญหาการออกแบบโครงข้อหมุน 3 ชั้นส่วน (Three-bar truss design) [5] ปัญหาการออกแบบเกียร์ทดรอบ (Compound gear design) [6] และอื่นๆ [7-9] เป็นต้น

จากประสิทธิภาพการแก้ปัญหาที่เหมาะสมของ WSA ข้างต้นพบว่า WSA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถดัดแปลงและใช้แก้ปัญหาได้อย่างหลากหลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการประยุกต์ใช้ WSA สำหรับออกแบบที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนร่วมกับโมเมนต์บิด โดยมีวัตถุประสงค์คือการเลือกพารามิเตอร์ของ WSA ที่ทำให้ผลการออกแบบมีความประหยัดที่สุด มีความปลอดภัยและสอดคล้องมาตรฐาน ACI318-11 [10] สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. ข้อกำหนดการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

มาตรฐานการออกแบบของ ACI ได้กำหนดสมการที่ (1) สำหรับพิจารณาการออกแบบกำลังรับโมเมนต์บิด ถ้าหากค่าโมเมนต์บิดประลัย (T_u) ที่กระทำมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 25 ของสมการที่ (1) หรือเป็นไปตามสมการที่ (2) ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องคำนวณผลของโมเมนต์บิดในคาน

$$T_{cr} = 1.1\sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \quad (1)$$

เมื่อ T_{cr} คือ โมเมนต์บิดแตกร้าว (กก. - ม.) f'_c คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก./ซม.²) A_{cp} คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน (ซม.²) และ P_{cp} คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดคาน (ซม.)

$$T_u \leq \frac{\phi T_{cr}}{4} \quad (2)$$

สมการสำหรับคำนวณกำลังรับโมเมนต์บิดในคาน (T_n) ตามสมการที่ (3)

$$\phi T_n = \phi \frac{2A_s f_y A_o}{s} \quad (3)$$

เมื่อ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังตามมาตรฐาน ACI ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกขาเดียว f_y คือ กำลังที่จุดครากของเหล็กปลอก (กก./ซม.²) s คือ ระยะเรียงของเหล็กปลอก (ซม.) และ A_o คือ พื้นที่ร้อยละ 85 ของพื้นที่หน้าตัดคาน (ซม.²) ที่อยู่ภายในกรอบของเหล็กปลอก (A_{oh}) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$A_o = 0.85 A_{oh} \quad (4)$$

การคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัดในหน้าตัดคานกำหนดใช้เป็นสมการที่ (5)

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (5)$$

เมื่อ M_n คือ กำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเมื่อพิจารณาจากแรงดึงในเหล็กเสริมในคาน (กก. - ม.) A_s คือ ปริมาณเหล็กเสริมของเหล็กดันทันโมเมนต์ดัด (ซม.²) f_y คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมดันทันโมเมนต์ดัด (กก./ซม.²) d คือ ค่าความลึกประสิทธิภาพ (ซม.) และ a คือ ค่าความลึกของกล่องหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมตามมาตรฐาน (ซม.) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (6)$$

เมื่อ b คือ ขนาดด้านกว้างของหน้าตัดคาน (ซม.)

สมการสำหรับตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนและโมเมนต์บิดของเหล็กปลอกถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ (7) ซึ่งเป็นสมการผลรวมของหน่วยแรงเฉือนและแรงบิดที่เกิด

จากหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงบิดจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่ยอมให้ตามสมการที่ (8)

$$\tau_{vt} = \sqrt{\left(\frac{V_u}{bd}\right)^2 + \left(\frac{T_u P_h}{1.7 A_{0h}}\right)^2} \quad (7)$$

เมื่อ τ_{vt} คือ หน่วยแรงเฉือนร่วมกับโมเมนต์บิดที่เกิดจากหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงบิด (กก./ซม.²) V_u คือ แรงเฉือนประลัยที่กระทำ b คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน (ซม.) d คือ ความลึกประสิทธิผลของคาน (ซม.) และ P_h คือ ความยาวรอบรูปของเหล็กปลอก (ซม.)

$$\tau_{vt,allow} = \phi \left(\frac{V_c}{bd} + 2.1 \sqrt{f'_c} \right) \quad (8)$$

เมื่อ $\tau_{vt,allow}$ คือ หน่วยแรงเฉือนร่วมกับโมเมนต์บิดที่คานรับได้ V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต (กก.) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} bd \quad (9)$$

ปริมาณเหล็กเสริมในแนวนอนสำหรับต้านทานโมเมนต์ดัดจะต้องมีค่าที่มากกว่าสมการที่ (10)

$$A_{s,min} = \frac{14}{f_y} bd \quad (10)$$

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมสำหรับรับแรงเฉือนร่วมกับโมเมนต์บิดขั้นต่ำ หรือ $A_{v,min}$ (ซม.²) ถูกกำหนดเป็นสมการที่ (11)

$$A_{v,min} = \frac{3.5bs}{f_v} \quad (11)$$

ปริมาณเหล็กเสริมตามยาวขั้นต่ำ หรือ $A_{l,min}$ (ซม.²) สำหรับต้านทานโมเมนต์บิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12)

$$A_{l,min} = \frac{1.33 \sqrt{f'_c} A_{cp}}{f_y} - \frac{A_t P_h}{s} \frac{f_v}{f_y} \quad (12)$$

เมื่อ A_t คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกขาเดียว (ซม.²) โดยที่ A_t/s ต้องมีค่าที่สอดคล้องกับสมการที่ (13)

$$\frac{A_t}{s} \leq 1.76 \frac{b}{f_y} \quad (13)$$

สำหรับปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดในหน้าตัดที่ยอมให้ หรือ $A_{s,max}$ (ซม.²) ถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ (14)

$$A_{s,max} = 0.75 \left(\frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \right) \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) bd \quad (14)$$

เมื่อ β_1 จะมีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อ f'_c ไม่เกิน 280 กก./ซม.² ถ้าหากเกินกว่านั้นให้คำนวณโดยใช้สมการที่ (15) ซึ่งหากคำนวณแล้วได้ค่าน้อยกว่า 0.65 จะต้องเลือกใช้เท่ากับ 0.65

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) \quad (15)$$

3. วิธีจิ้งจอกน้ำ

ลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหาที่เหมาะสมของวิธีจิ้งจอกน้ำ หรือ WSA ประกอบไปด้วยกระบวนการทำซ้ำ 4 ส่วนที่สำคัญประกอบด้วย การเกิด (Initial birth) การผสมพันธุ์ (Mating) การหาอาหาร (Feeding) ตายและสร้างทายาทใหม่ (Dead and succession) โดยมีลำดับดังรูปที่ 1 ซึ่งในแต่ละส่วนได้อธิบายไว้ตามหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

Water strider algorithm

```

Initial birth
While (terminating condition is not met) do
    Mating
    Feeding
    Dead and succession
End
Return  $WS_{optimum}$ 
    
```

รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานในรูปแบบเบรหัสเทียมของ WSA

3.1 การเกิด

จิ้งจอกน้ำ (Water strider, WS) จะเกิดมาพร้อมกับไข่ที่กระจายอยู่ในทะเลสาบในลักษณะการแจกแจงแบบสุ่มดังสมการที่ (16)

$$WS_i^0 = L_{bound} + rand \times (U_{bound} - L_{bound}) \quad (16)$$

เมื่อ WS_i^0 คือ การกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของจิงโจ้น้ำ ลำดับที่ i ค่า $Rand$ คือ ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1 ค่า L_{bound} คือ ขอบเขตล่างหรือค่าต่ำสุดของปัญหา และ U_{bound} คือ ขอบเขตบนหรือค่าสูงสุดของปัญหา

3.2 การผสมพันธุ์

การผสมพันธุ์เป็นขั้นตอนการสร้างคำตอบใหม่ด้วยการจับคู่ของตัวผู้และตัวเมีย ความน่าจะเป็นของการจับคู่สำเร็จเท่ากับ p และเพื่อความง่ายต่อการใช้งาน ค่า p ถูกกำหนดเป็นร้อยละ 50 นั่นคือ การจับคู่ผสมพันธุ์มีโอกาสสำเร็จร้อยละ 50 ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (17) และกรณีอื่นๆ คือการผสมพันธุ์ไม่สำเร็จ

$$WS_i^{t+1} = \begin{cases} WS_i^t + R.rand & \text{mating happen} \\ WS_i^t + R.(1+rand) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

เมื่อ WS_i^{t+1} คือ ตำแหน่งใหม่ของจิงโจ้น้ำ WS_i^t คือ ตำแหน่งปัจจุบันของจิงโจ้น้ำ และ R คือเวกเตอร์ที่มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่งของตัวผู้และตำแหน่งของตัวเมียในฝูงเดียวกันซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (18)

$$R = WS_F^{t-1} - WS_i^{t-1} \quad (18)$$

เมื่อ WS_F^{t-1} คือ ตำแหน่งของตัวเมีย และ WS_i^{t-1} คือ ตำแหน่งของตัวผู้

3.3 การหาอาหาร

ในการประเมินตำแหน่งของอาหารนั้น จะประเมินจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หากค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีกว่าค่าปัจจุบัน แสดงว่าได้พบแหล่งอาหารแล้ว แต่ถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แย่กว่าค่าปัจจุบัน ก็ควรย้ายไปสู่แหล่งที่อยู่อาศัยรอบๆ จิงโจ้น้ำที่ดีที่สุดตามสมการที่ (19)

$$WS_i^{t+1} = WS_i^t + 2rand.(WS_{BL}^t - WS_i^t) \quad (19)$$

เมื่อ WS_{BL}^t คือ ตำแหน่งของจิงโจ้น้ำที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีที่สุด

3.4 ตายและสร้างทายาทใหม่

หากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่แย่งลงกว่าเดิม WS จะตาย และตำแหน่งของมันจะถูกสุ่มเริ่มต้นภายในขอบเขตของปัญหาตามสมการที่ (20)

$$WS_i^{t+1} = L_{bound} + Rand \times (U_{bound} - L_{bound}) \quad (20)$$

ในขั้นตอนสุดท้ายของอัลกอริทึม หากงานครบตามเงื่อนไขการสิ้นสุด อัลกอริทึมจะหยุดและแสดงคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าเงื่อนไขยังไม่ครบ มันจะกลับไปทำขั้นตอนการผสมพันธุ์เพื่อวนรอบใหม่ของวงจรชีวิต

4. ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

4.1 ขอบเขตการออกแบบ

งานวิจัยนี้เขียนโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้ Microsoft visual studio 2019 ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 แบบ 64 บิต และมีขอบเขตการทำงานตามตารางที่ 1 ประกอบด้วย f'_c ที่เลือกได้เท่ากับ 140 180 210 240 280 300 320 350 380 420 และ 450 กก./ชม.² f_y ที่เลือกได้เท่ากับ 3,000 4,000 และ 5,000 กก./ชม.² เหล็กเสริมคอนกรีตทั้งในส่วนของ การรับโมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิดมีตั้งแต่ DB12 DB16 DB20 DB25 DB28 DB32 DB36 และ DB40 จำนวนเหล็กเสริมมีตั้งแต่ 2 เส้น ไปจนถึง 20 เส้น/ชั้น ปรับเพิ่มครั้งละ 1 เส้น ส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกำหนดใช้ DB10 DB12 และ DB16 มีระยะเรียงตั้งแต่ 100 มม. ไปจนถึง 500 มม. โดยปรับเพิ่มครั้งละ 25 มม.

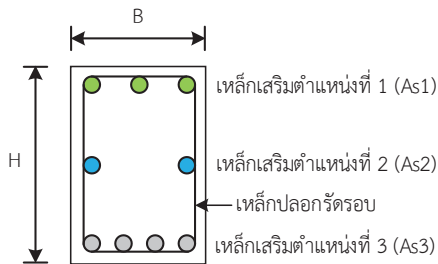
ตารางที่ 1 ตัวแปรและขอบเขตของการออกแบบ

ตัวแปรออกแบบ	ต่ำสุด	ปรับเพิ่มครั้งละ	ค่าสูงสุด
f'_c (กก./ชม. ²)	140	*	450
f_y (กก./ชม. ²)	3,000	1,000	5,000
B (ชม.)	20	5	1,000
H (ชม.)	20	5	1,000
ชนิดเหล็กเสริมแนวนอน	DB12	-	DB40
จำนวนเหล็กเสริมแนวนอน (เส้น/ชั้น)	2	1	20
ขนาดเหล็กปลอก	DB10	-	DB16
ระยะเรียงเหล็กปลอก (มม.)	100	25	500

*หมายเหตุ ตามกำลังอัดที่กำหนด

รายละเอียดการเสริมเหล็กในหน้าตัดคาน แบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2 ได้แก่ ตำแหน่งที่ 1 เหล็กเสริมในแนวนอนสำหรับรับโมเมนต์ดัดชั้นบนสุด (As1) ตำแหน่งที่ 2 เหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดร่วมกับโมเมนต์บิด

(As2) ตำแหน่งที่ 3 เหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด (As3) และ ตำแหน่งที่ 4 เหล็กปลอกรับแรงเฉือนร่วมกับโมเมนต์บิด



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในหน้าตัดคาน

4.2 สมการเป้าหมาย

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ฟังก์ชันผลรวมของราคาได้แก่ ราคาคอนกรีต เหล็กเสริมในคอนกรีตและแบบหล่อที่ทำให้ผลการออกแบบมีความประหยัดมากที่สุดตามสมการที่ (21)

$$F_{cost} = \text{Min} \sum V_C C_C + V_S C_S + V_F C_F \quad (21)$$

เมื่อ V_C V_S และ V_F คือ ปริมาณของ คอนกรีต (m^3) เหล็กเสริม (กก.) และแบบหล่อ (m^2) ตามลำดับ สำหรับ C_C C_S และ C_F คือ ราคาต่อหน่วยของคอนกรีต (บาท/ m^3) เหล็กเสริม (บาท/กก.) และแบบหล่อ (บาท/ m^2) ตามลำดับ

ราคาต่อหน่วยของวัสดุรวมค่าแรงสำหรับใช้คำนวณกำหนดเป็นดังนี้คือ ราคาคอนกรีตผสมเสร็จ (C_C) กำหนดใช้ราคาตามสมการที่ (22) หน่วยเป็นบาท/ m^3 ราคาแบบหล่อเท่ากับ 626 บาท/ m^2 เหล็กเสริมระดับชั้น SD30 SD40 และ SD50 กำหนดเป็น 22.30 22.80 และ 23.20 บาท/กก. ตามลำดับ ราคาเหล่านี้มาจากบัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานสำหรับอาคารเรียนในสังกัดสำนักงานการศึกษาขั้นพื้นฐานปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 [11] ซึ่งราคาเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของแต่ละท้องถิ่น

$$C_C = 1.406f'_c + 2400.1 \quad (22)$$

4.3 ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

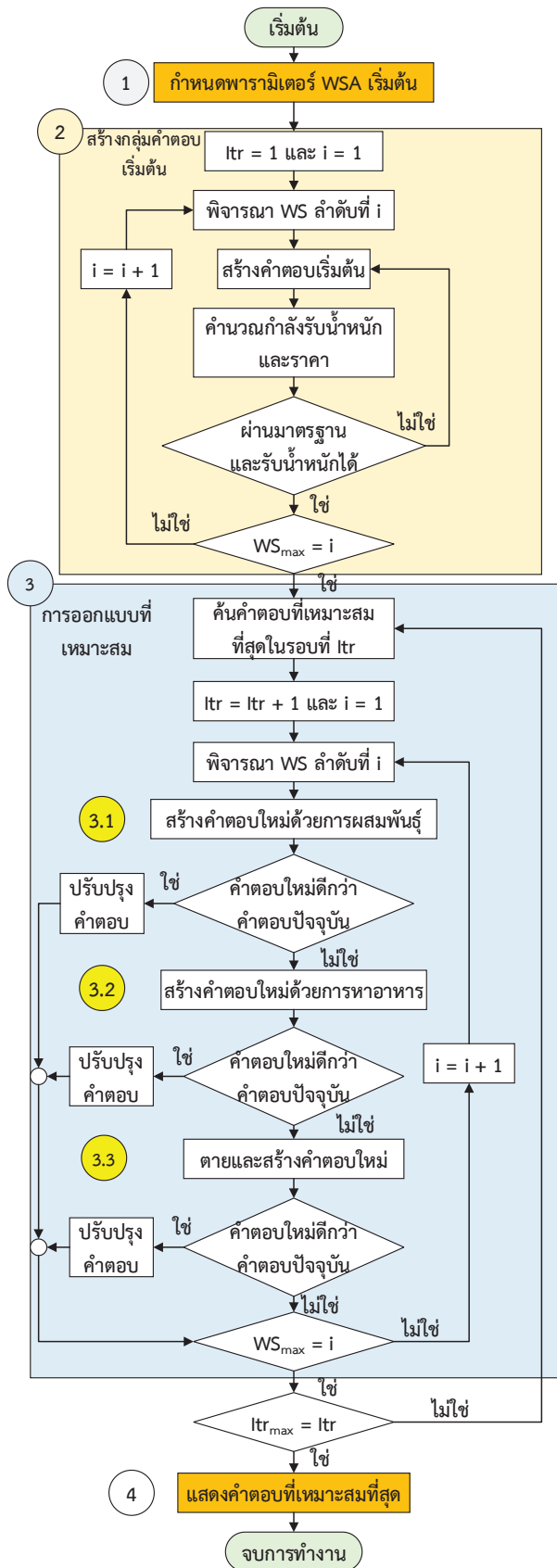
การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดร่วมกับโมเมนต์บิดมีลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 3 ซึ่งการทำงานแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) เริ่มต้นด้วยการกำหนดกำลังต้านทานแรงภายในประลัยของหน้าตัด (โมเมนต์ดัด โมเมนต์บิด และแรงเฉือน) จากนั้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ WSA ได้แก่ จำนวนจิงโจ้น้ำสูงสุด (WS_{max}) จำนวนรอบการทำงานสูงสุด ($l_{tr_{max}}$)

2) ขั้นตอนการสร้างกลุ่มคำตอบเริ่มต้น เป็นขั้นตอนสร้างคำตอบที่เป็นไปได้แบบสุ่มอย่างกว้างซึ่งจะทำการสุ่มไปเรื่อย ๆ จนกว่าทุกคำตอบที่สร้างได้สอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบ รับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยและจำนวนคำตอบมีค่าเท่ากับ WS_{max} พร้อมกับการกำหนดรอบการทำงานเป็นรอบที่ 1

3) ขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม คำตอบใหม่จะถูกสร้างขึ้นด้วย 3 ขั้นตอน นั่นคือ ขั้นตอนที่ 3.1 การสร้างคำตอบด้วยการผสมพันธุ์ตามสมการที่ (17) ถ้าหากคำตอบที่สร้างมายังไม่ดีขึ้น ต้องมีการสร้างคำตอบอีกครั้งด้วยการออกหาอาหารในขั้นตอนที่ 3.2 ตามสมการที่ (19) แต่ถ้าหากคำตอบที่สร้างมายังไม่ดีขึ้นอีก จะต้องสร้างคำตอบใหม่โดยใช้สมการที่ (20) ตามขั้นตอนที่ 3.3 ในแต่ละขั้นตอน หากคำตอบใหม่มีราคาที่ประหยัดกว่าคำตอบเดิม คำตอบเดิมจะถูกแทนที่ทันที จากนั้น กระบวนการเหล่านี้จะวนทำซ้ำอีกครั้งจนกว่าจำนวนรอบการทำงานปัจจุบันจะเท่ากับ $l_{tr_{max}}$

4) ค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่มคำตอบทั้งหมดจากการทำงานในรอบสุดท้ายและแสดงผลของคำตอบ



รูปที่ 3 ลำดับขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

6. ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบการออกแบบนำมาจาก Macginley และ Choo [12] จำนวน 3 ตัวอย่าง มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 เป็นตัวอย่างที่มีการกำหนดแรงเฉือนโมเมนต์บิดและโมเมนต์ดัดประลัยที่มีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่	Vu (กก.)	Tu (กก.-ม.)	Mu (กก.-ม.)
1	27,216	4,148	57,934
2	20,904	1,326	39,524
3	12,339	1,785	29,776

การทดสอบประสิทธิภาพและการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของ WSA ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1) การทดสอบทางสถิติเพื่อหา ltr_{max} ที่เหมาะสมต่อการใช้งานซึ่งใช้ตัวอย่างที่ 1 กำหนดค่า ltr_{max} ตั้งแต่ 100 ถึง 500 และปรับเพิ่มครั้งละ 50 โดยกำหนดใช้ WS_{max} เท่ากับ 100 จากนั้น ออกแบบซ้ำพารามิเตอร์ละ 10 ครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ

2) การทดสอบเพื่อหาจำนวน WS_{max} ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยในการทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างที่ 1 เช่นเดียวกัน โดยเลือกใช้ ltr_{max} ที่เหมาะสมจากการทดสอบทางสถิติในข้อที่ 1) และกำหนดค่า WS_{max} ตั้งแต่ 100 ถึง 400 ปรับเพิ่มครั้งละ 50 จากนั้น ออกแบบซ้ำพารามิเตอร์ละ 10 ครั้ง เช่นเดียวกัน

3) การนำค่า ltr_{max} และ WS_{max} ออกแบบกับตัวอย่างอื่น เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมและเปรียบเทียบผลการออกแบบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

7. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการเลือกใช้ค่า ltr_{max} โดยกำหนดใช้จำนวน WS_{max} เท่ากับ 100 ทดสอบค่าละ 10 ครั้งแสดงในตารางที่ 3 พบว่า การเลือกใช้ ltr_{max} ตั้งแต่ 350 ได้รับคำตอบที่เหมาะสมที่มีราคาเท่ากับ 2,348 บาท/ม. โดยที่ การเลือกใช้ ltr_{max} เท่ากับ 350 ได้รับค่าความแปรปรวนและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดโดยที่ราคาเฉลี่ยต่างจาก ltr_{max} เท่ากับ 500 เพียง 2 บาท/ม. เท่านั้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ ltr_{max} เท่ากับ 350 ที่มีค่าทางสถิติที่ใกล้เคียงกับ 500 และใช้เวลาออกแบบที่น้อยกว่า

ตารางที่ 3 ผลทางสถิติการกำหนดจำนวนรอบ

$I_{tr_{max}}$ (รอบ)	ค่าต่ำสุด (บาท)	ค่าเฉลี่ย (บาท)	ค่าความแปรปรวน (บาท)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (บาท)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
100	2,360	2,373	229	15.1	0.96
150	2,360	2,366	110	10.5	1.20
200	2,348	2,359	149	12.2	1.48
250	2,360	2,364	52	7.2	1.76
300	2,359	2,364	64	8.0	2.00
350	2,348	2,360	23	4.8	2.33
400	2,348	2,359	62	7.9	2.59
450	2,348	2,365	49	7.0	2.91
500	2,348	2,358	29	5.4	3.16

ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อกำหนด WS_{max} ค่าต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4 พบว่า ทุกค่าของ WS_{max} ได้รับคำตอบที่เหมาะสม ในขณะที่ WS_{max} เท่ากับ 300 ได้รับค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด ในทางกลับกัน การเลือกใช้ WS_{max} ที่เพิ่มขึ้นกลับไม่ได้ทำให้ค่าทางสถิติดีขึ้นแต่อย่างใด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า WS_{max} เท่ากับ 300 ในการออกแบบกับตัวอย่างอื่น ๆ

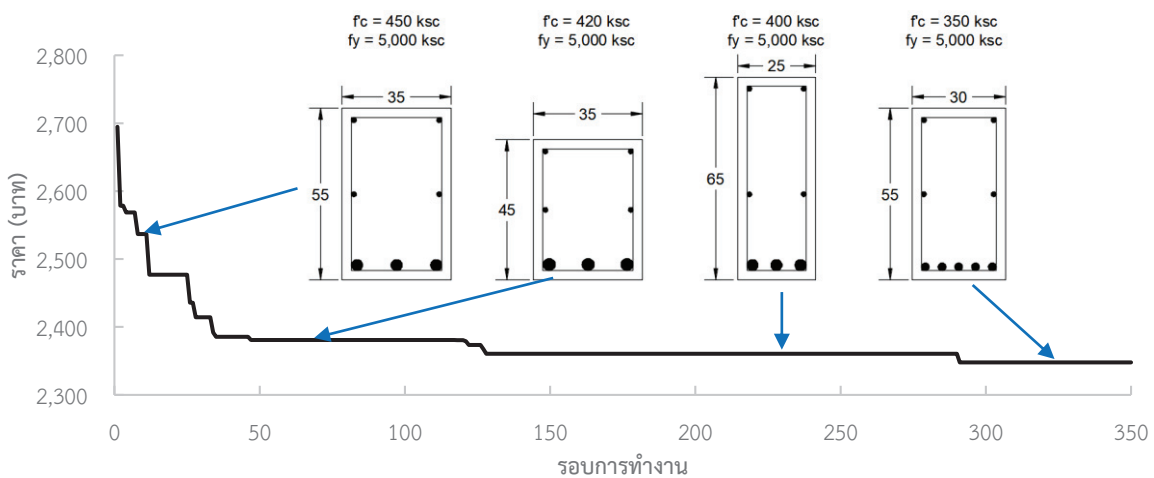
ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 4 พบว่า มีลักษณะที่เร็วมากในช่วง 50 รอบ คล้ายกับการตกเขา จากนั้น WSA มีลักษณะการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเป็นระยะ ๆ จนหยุดการทำงาน นอกจากนี้ การ

เลือกใช้ f'_c ขนาดหน้าตัดคานและปริมาณเหล็กเสริมมีอัตราการลดลงอย่างต่อเนื่องตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ผลทางสถิติการกำหนดจำนวนจิงจิ้งน้ำ

WS_{max} (ตัว)	ค่าต่ำสุด (บาท)	ค่าเฉลี่ย (บาท)	ค่าความแปรปรวน (บาท)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (บาท)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
100	2,348	2,357	92.8	9.6	2.33
150	2,348	2,359	42.5	6.5	3.39
200	2,348	2,358	85.1	9.2	4.64
250	2,348	2,357	90.1	9.5	5.96
300	2,348	2,354	38.3	6.2	6.85
350	2,348	2,356	43.8	6.6	7.94
400	2,348	2,355	41.2	6.4	8.96

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของ WSA ทั้ง 3 ตัวอย่างเมื่อเลือกใช้ $I_{tr_{max}}$ เท่ากับ 350 และ WS_{max} เท่ากับ 300 แสดงในตารางที่ 5 พบว่า WSA เลือกใช้กำลังของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่สูงกว่าวิธีดั้งเดิม [12] ทุกตัวอย่าง จึงทำให้ผลการออกแบบคานมีหน้าตัดที่เล็กกว่าและมีปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยกว่าทุกตัวอย่าง ดังนั้น จึงทำให้ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ WSA มีความประหยัดมากกว่าในทุกตัวอย่างร้อยละ 19.6 27.6 และ 16.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมระหว่างวิธีดั้งเดิมและ WSA

ตัวแปรออกแบบ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3	
	แบบดั้งเดิม [12]	WSA	แบบดั้งเดิม [12]	WSA	แบบดั้งเดิม [12]	WSA
f'_c (กก./ชม. ²)	280	350	250	350	300	420
f_y (กก./ชม. ²)	4,000	5,000	4,000	5,000	4,000	5,000
B (ชม.)	41	30	35	20	30	20
H (ชม.)	66	55	50	50	50	50
เหล็กเสริมบน, As1	2#4	2-DB16	2-DB20	2-DB16	2-DB12	2-DB16
เหล็กเสริมกลาง, As2	2#4	2-DB16	2-DB12	2-DB16	2-DB12	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง, As3	5#8	6-DB25	6-DB25	3-DB32	4-DB25	2-DB32
เหล็กปลอก	#4@17.78 ชม.	DB16@40 ชม.	DB12@15 ชม.	DB10@25 ชม.	DB12@17.5 ชม.	DB16@50 ชม.
ราคารวม (บาท/ม.)	2,921	2,348	2,466	1,786	2,040	1,695
ร้อยละความแตกต่าง	19.6		27.6		16.9	

8. สรุปผลการทดสอบ

ผลการประยุกต์ใช้วิธีจิ้งจิกน้ำสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า วิธีจิ้งจิกน้ำเป็นวิธีการใหม่ที่มีขั้นตอนการทำงานไม่ซับซ้อนและมีความง่ายต่อประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับโมเมนต์ดัดร่วมกับโมเมนต์บิด อีกทั้งยังพบว่า การเลือกใช้จำนวนรอบการทำงานสูงสุดเท่ากับ 350 รอบและจำนวนจิ้งจิกน้ำสูงสุดเท่ากับ 300 ตัว ได้รับความวิเคราะห้ทางสถิติที่ดีที่สุด นอกจากนี้ ผลการออกแบบที่เหมาะสมของวิธีจิ้งจิกน้ำเลือกใช้กำลังอัดคอนกรีตและกำลังรับแรงดิ่งที่จุดครากของเหล็กเสริมที่สูงกว่า ส่งผลให้ขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมในคานมีค่าน้อยกว่าวิธีดั้งเดิม จึงทำให้วิธีจิ้งจิกน้ำได้รับการออกแบบที่มีความประหยัดกว่าวิธีทั่วไปร้อยละ 16.90 ถึง 27.60

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่นที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

10. เอกสารอ้างอิง

[1] D. Hu and J. Bush, "The hydrodynamics of water-walking arthropods," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 644, no. 1, pp. 5-33, 2010.

[2] A. Kaveh and D. A. Eslamlou, "Water strider algorithm: A new metaheuristic and applications," *Structures*, vol. 25, no. 1, pp. 520-541, 2020.

[3] F. Herrera, M. Lozano and D. Molina, "Test suite for the special issue of soft computing on scalability of evolutionary algorithms and other metaheuristics for large scale continuous optimization problems," Technical report, SCI2S, University of Granada, Spain, 2010.

[4] C. Coello, "Use of a self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems," *Computers in Industry*, vol. 41, no. 2, pp. 113-127, 2000.

[5] T. Ray and P. Saini, "Engineering design optimization using a swarm with an intelligent information sharing among individuals," *Engineering Optimization*, vol. 33, no. 6, pp. 735-748, 2001.

[6] B. Kannan and S. Kramer, "An augmented lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design," *Journal of mechanical design*, vol. 116, no. 2, pp. 405-411, 1994.

- [7] H. Chickermane and H. Gea, "Structural optimization using a new local approximation method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 39, no. 5, pp. 829-846, 1996.
- [8] S. Gerist and M. Maheri, "Structural damage detection using imperialist competitive algorithm and damage function," *Applied Soft Computing*, vol. 77, no. 1, pp. 1-23, 2019.
- [9] A. Kaveh and M. Moradveisi, "Optimal design of double-layer barrel vaults using CBO and ECBO algorithms," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 40, no. 3, pp. 167-178, 2016.
- [10] ACI American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-11), Detroit: America, 2011.
- [11] Office of the Basic Education Commission, Cost of construction materials and labor costs, Bangkok, 2020.
- [12] T. Macginley and B. Choo, Reinforced concrete design theory and examples, Newyork: America, 2014.