

การผสมผสานของวิธีฝูงอนุภาคกับวิธีเชิงพันธุกรรมและวิธีจำลองการหล่อ
 อบเหนียวสำหรับออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
**HYBRIDIZATION OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION WITH GENETIC
 ALGORITHM AND SIMULATED ANNEALING ALGORITHM FOR
 OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

อัสนัย ทาเป้า¹ และ เรืองรุทธิ์ ชีระโรจน์²

¹อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
 วิทยาเขตขอนแก่น, 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000,
 assanai.tapao@gmail.com

²อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง
 อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150, raungrut.c@msu.ac.th

Assanai Tapao¹ and Raungrut Cheerarot²

¹Lecturer, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
 Technology Isan, Khonkaen, 150 Sri Chant Road, Nai Mueang Sub-District, Muang District,
 Khonkaen 40000, Thailand, assanai.tapao@gmail.com

²Lecturer, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
 Khamriang Sub-District, Kantarawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand,
 raungrut.c@msu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการผสมผสานวิธีฝูงอนุภาคกับวิธีเชิงพันธุกรรมและวิธีจำลองการหล่อ
 อบเหนียวสำหรับแก้ปัญหาการออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ฟังก์ชัน
 วัตถุประสงค์เป็นราคารวมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีฝูงอนุภาคแบบผสมผสานถูก
 พัฒนาและประเมินผลการออกแบบตามมาตรฐาน ACI318-08 จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพ
 ของวิธีฝูงอนุภาคแบบผสมผสานโดยการทดสอบผลทางสถิติจากตัวอย่างโครงสร้างคอนกรีตเสริม
 เหล็กที่มีขนาดแตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า วิธีฝูงอนุภาคแบบผสมผสานสามารถ
 ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ใต้รับผลการออกแบบที่

มีความประหยัดและได้รับผลการทดสอบทางสถิติที่ดีกว่าวิธีฝูงอนุภาคดั้งเดิมทุกตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ ยังได้รับผลการออกแบบที่มีความประหยัดมากกว่างานวิจัยที่เปรียบเทียบทุกตัวอย่าง

คำสำคัญ: วิธีฝูงอนุภาคเชิงผสมผสาน, การออกแบบที่เหมาะสม, การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ABSTRACT

This research introduces the hybridization of a particle swarm optimization with genetic algorithm and simulated annealing algorithm for solving optimum design of reinforced concrete structures. The objective function is the total cost of reinforced concrete structure. Hybrid particle swarm optimization is developed and evaluated the design results according to ACI318-08. Then, the performances of hybrid particle swarm optimization are demonstrated by statistical results from different reinforced concrete structure design examples. From the results showed that, the hybrid particle swarm optimization can be used to design an appropriate reinforced concrete structures effectively which obtains the best economical design results and the better statistical results than that of the particle swarm optimization for all design examples. In addition, the optimum solutions have saving cost than the related literature for all examples.

KEYWORDS: hybrid particle swarm optimization, optimum design, reinforced concrete design

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้วิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic algorithm) สำหรับแก้ปัญหการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมอย่างแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากวิธีเมตาฮิวริสติกเป็นวิธีที่สามารถออกแบบโครงสร้างได้สอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนด มีความปลอดภัย มีราคาที่เหมาะสม และรวดเร็ว อีกทั้งสามารถลดปัญหาการลองผิดลองถูกของผู้ออกแบบได้เป็นอย่างดี [1] สำหรับวิธีที่นิยมใช้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วย วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) [2-5] วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (Artificial bee colony algorithm: ABC) [6] วิธีจำลองการระเบิดของเอกภพ (Big bang-big crunch algorithm: BB-BC) [7] วิธีความไพเราะของเสียง (Harmony search algorithm: HS) [8] และวิธีค้นหาแบบค้างคาว (Bat algorithm: BA) [9] เป็นต้น ซึ่งต่อมา มีหลายงานวิจัยพยายามเพิ่มประสิทธิภาพวิธีเหล่านี้ด้วยการผสมผสานกับวิธีการอื่นเช่น การผสมวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์กับวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Hybrid Artificial Bee

Colony with Differential Evolution: HABCDE) [10] การลดจำนวนรอบและทรัพยากรการคำนวณลงด้วยการผสมผสานวิธีฝูงมดร่วมกับฝูงอนุภาค (Heuristic particle swarm ant colony optimization) [11] การผสมของการพัฒนา HS ให้แม่นยำขึ้นโดยนำมาผสมกับเทคนิค TA (Threshold accepting) [12] และการผสมวิธีฝูงมด (Ant colony optimization algorithm) กับวิธีหิ่งห้อย (Fireflies algorithm) สำหรับแก้ปัญหาการกำหนดเส้นทางยานพาหนะ [13] เป็นต้น ซึ่งผลทดลองพบว่า วิธีการเชิงผสมผสานทั้งหมดล้วนได้รับผลการทดสอบทางสถิติและคำตอบที่เหมาะสมของแต่ละปัญหามากกว่าวิธีเมตาฮิวริสติกแบบดั้งเดิม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า วิธีเมตาฮิวริสติกสามารถแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและสามารถพัฒนาร่วมกับวิธีอื่นได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการผสมผสาน วิธีฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization: PSO) ร่วมกับ GA และวิธีจำลองการหลอมเย็น (Simulated annealing algorithm: SA) เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความเร็วต่อการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมสำหรับออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ผลการทดสอบทางสถิติเป็นค่าชี้วัดและพิจารณาผลการออกแบบที่เหมาะสมให้มีความสอดคล้องกับมาตรฐาน ACI318-08 [14]

2. มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยนี้พิจารณาออกแบบชิ้นส่วนของคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่านั้น โดยกำหนดใช้มาตรฐาน ACI318-08 [14] ตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดในหน้าตัดคานและแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดในหน้าตัดเสาเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีฝูงอนุภาคแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้นกับงานวิจัยของ Kaveh และ Sabzi [11] ได้

2.1 โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานคอนกรีตเสริมเหล็กพิจารณาออกแบบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านลึก (h) มากกว่าด้านแคบ (b) และมีการเสริมเหล็กตลอดความยาวคานอย่างน้อย 4 เส้นเพื่อใช้สำหรับต้านทานแรงดัดบวมและลบที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) โดยต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่กระทำ (M_u)

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

เมื่อ ϕ คือ ค่าตัวคูณลดกำลังรับโมเมนต์ดัดตามมาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.90 ค่า M_n คือ ค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานที่สามารถรับได้ (กก. - ม.) A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในหน้าตัดคาน (ซม.²) f_y คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (กก./ซม.²) d คือ ค่าความลึก

ประสิทธิภาพ (ชม.) และ a คือ ค่าความลึกของหน่วยแรงรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2) มีหน่วยเป็น ชม.

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

เมื่อ f'_c คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก./ชม.²) และ b คือด้านแคบของหน้าตัดคาน (ชม.)

สำหรับอัตราส่วนของปริมาณของเหล็กเสริมในหน้าตัด (ρ) ต้องมีค่ามากกว่าสัดส่วนของเหล็กเสริมขั้นต่ำ (ρ_{min}) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3) แต่ต้องมีค่าไม่เกินสัดส่วนของเหล็กเสริมสูงสุดที่ยอมให้ (ρ_{max}) ตามสมการที่ (4)

$$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y} \geq \frac{1.4}{f_y} \quad (3)$$

$$\rho_{max} = 0.75 \left(\frac{0.85 \beta_1 f'_c (600)}{f_y (600 + f_y)} \right) \quad (4)$$

เมื่อ β_1 คือ ค่าตัวคูณประกอบตามมาตรฐานการออกแบบซึ่งมีค่าไม่น้อยกว่า 0.65 แต่มีค่าไม่เกิน 0.85

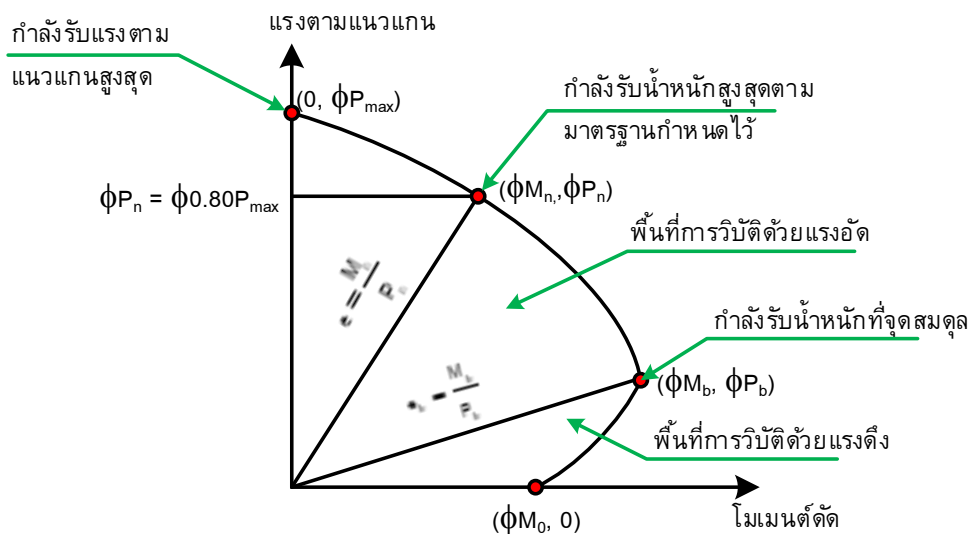
2.2 โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังรับน้ำหนักของเสาพิจารณาออกแบบในเรื่องของกำลังรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดแกนเดียวโดยใช้แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction diagram) ดังรูปที่ 1 ซึ่งพิจารณาจากตำแหน่งที่สำคัญจำนวน 4 ตำแหน่งได้แก่ ตำแหน่งกำลังรับแรงตามแนวแกนสูงสุด ($0, \phi P_{max}$) ตำแหน่งกำลังรับน้ำหนักสูงสุดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ ($\phi M_n, \phi P_n$) กำลังรับน้ำหนักบริเวณจุดสมดุล ($\phi M_b, \phi P_b$) และตำแหน่งกำลังรับแรงตามแนวแกนเป็น 0 ($\phi M_0, 0$) โดยในแต่ละตำแหน่งเกิดจากการสมดุลแรงภายในหน้าตัดเสตามสมการที่ (5) สำหรับแรงตามแนวแกนและสมการที่ (6) สำหรับโมเมนต์ดัดในหน้าตัดเสา

$$\phi P_n = \phi (C_{nc} + C_{ns} - T_n) \quad (5)$$

$$\phi M_n = \phi \left[C_{nc} \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_{ns} \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T_n \left(d - \frac{h}{2} \right) \right] \quad (6)$$

เมื่อ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังรับน้ำหนักของเสาซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.65 ค่า P_n คือ กำลังรับแรงตามแนวแกนของหน้าตัดเสา (กก.) C_{nc} คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก.) C_{ns} คือ กำลังรับแรงอัดของเหล็กเสริมด้านรับแรงอัด (กก.) T_n คือ กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมด้านรับแรงดึง (กก.) h คือ ด้านลึกของหน้าตัดเสา (ซม.) และ d' คือ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (ซม.)



รูปที่ 1 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

มาตรฐาน ACI318-08 ได้กำหนดปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัดเสาที่คำนวณจากสมการที่ (7) แล้วต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 1 และไม่เกินร้อยละ 8 ของขนาดหน้าตัดเสา

$$\rho = \frac{A_{st}}{A_g} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ A_{st} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในเสาทั้งหมด (ซม.²) และ A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของเสา (ซม.²)

3. การพัฒนาวิธีค้นหาแบบฝูงอนุภาคเชิงผสมผสาน

3.1 วิธีค้นหาแบบฝูงอนุภาค

วิธีฝูงอนุภาค (PSO) ถูกคิดค้นโดย Eberhart และ Kennedy [15] ในปี ค.ศ.1995 โดยเป็นวิธีการเลียนแบบการบินของฝูงนกที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกันเป็นกลุ่มตลอดเวลาออกหาอาหาร PSO ได้กำหนดให้ฝูงนกเปรียบเสมือนฝูงอนุภาค (Particles) ที่เคลื่อนที่ในปริภูมิค้นหา (Search space) โดยอนุภาคแต่ละตัวจะมีการจดจำตำแหน่งปัจจุบัน (x_i) ของตนเองไว้และมีการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ด้วยความเร็ว (v_i) ตามผู้นำฝูง (N_{best}) จากนั้น PSO จะค้นหาแหล่งอาหารใหม่อีกครั้งจนกว่าจะพบแหล่งอาหารที่ดีที่สุด [16] ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เริ่มต้นด้วยการบินแบบสุ่มของอนุภาคแต่ละตัวเพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้น
- 2) อนุภาคมองหาตำแหน่งใหม่โดยพิจารณาจากความเร็วดังสมการที่ (8) และตำแหน่งใหม่ตามสมการที่ (9)

$$v_i = \mu_1 (N_{best}(t) - N_i(t)) + \mu_2 (X_{best}(t) - x_i(t)) \quad (8)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i \quad (9)$$

เมื่อ t คือ ช่วงเวลาใดๆ N_i คือ ลำดับที่อนุภาคอยู่ X_{best} คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุด μ_1 และ μ_2 คือ ค่าสุ่มที่มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1

- 3) ตรวจสอบตำแหน่งใหม่ ถ้าตำแหน่งใหม่ดีกว่า ให้ย้ายไปยังตำแหน่งใหม่ทันที
- 4) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดหรือจำนวนรอบการทำงาน ถ้าครบจำนวนรอบหรือเงื่อนไขการหยุด ให้หยุดการทำงานทันที แต่ถ้าไม่เข้าเงื่อนไขใด ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 2

3.2 วิธีเชิงพันธุกรรม

วิธีเชิงพันธุกรรม หรือ GA เป็นวิธีการจำลองมาจากการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ ที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยส่วนของ GA ที่จะถูกนำมาใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวิธีฝูงอนุภาคแบบผสมผสานมีจำนวน 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ การไขว้สายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation)

การไขว้สายพันธุ์ คือขั้นตอนการค้นหาคำตอบเฉพาะแห่งที่มีลักษณะการสลับเปลี่ยนตำแหน่งของตัวแปรออกแบบบางตำแหน่งดังสมการที่ (10) โดยความน่าจะเป็นในการไขว้สายพันธุ์ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับสมการที่ (11)

$$x_i(t+1) = \text{Random}(0,1) \times N_{\max}(t) \quad (10)$$

$$Cr = 0.2 \text{Fit}_{\text{best}} \quad (11)$$

เมื่อ Cr คือ ค่าความน่าจะเป็นสำหรับการไขว้สายพันธุ์ และ Fit_{best} คือ ค่าสมการเป้าหมายของอนุภาคที่ดีที่สุดในกลุ่ม

สำหรับการกลายพันธุ์จะนำสมการที่ถูกปรับปรุงโดย Gandomi และ Alavi [17] ดังสมการที่ (12) มาใช้งาน โดยที่โอกาสการกลายพันธุ์ (Mr) ขึ้นอยู่กับสมการที่ (13)

$$x_i(t+1) = x_{\text{best}}(t) + \mu(x_p(t) - x_q(t)) \quad (12)$$

เมื่อ μ คือ ค่าสุ่มใดๆ ที่มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1, x_p และ x_q คือ คือตำแหน่งของประชากรที่สุ่มได้จากในกลุ่ม

$$Mr = \frac{0.05}{\text{Fit}_{\text{best}}} \quad (13)$$

3.3 วิธีจำลองการหล่อบเหนียว

เทคนิคการจำลองการหล่อบเหนียว หรือ SA เป็นการนำแนวคิดของกระบวนการหลอมโลหะให้ร้อนจนเป็นของเหลวแล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ [18] โดยข้อดีของ SA คือ สามารถกำหนดพฤติกรรมการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้โดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงสมการความเร็ว v_i ให้มีความละเอียดมากขึ้นตามแนวคิดเดิมของ SA ดังสมการที่ (14) และกำหนดการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยสมการที่ (15) โดยที่อุณหภูมิจะถูกทดลองอย่างคงที่ด้วยอัตราร้อยละ α ตามสมการที่ (16) ในทุกรอบการทำงาน เพื่อชะลอความเร็วในการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังเพิ่มการย้ายตำแหน่งของอนุภาคที่แย่ที่สุดไปอยู่ใกล้กับผู้นำฝูงเพื่อให้ฝูงอนุภาคเกาะกลุ่มกันมากขึ้น

$$v_i = v_i + \mu_3 \quad (14)$$

เมื่อ μ_3 คือ ค่าสุ่มใดๆ ที่มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1

$$Pr_i = \exp\left(\frac{-\Delta E}{T_i}\right) \quad (15)$$

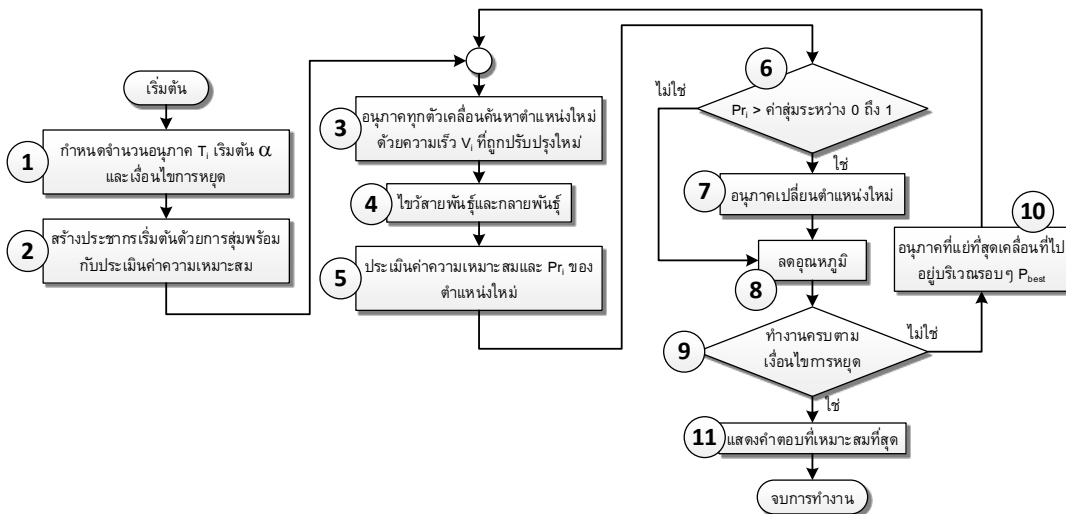
เมื่อ Pr_i คือ ค่าความน่าจะเป็นในการยอมรับตำแหน่งใหม่ ΔE คือ ค่าผลต่างของสมการเป้าหมายใหม่และสมการเป้าหมายปัจจุบัน และ T_i คือ ค่าอุณหภูมิปัจจุบัน

$$T_i = (1 - \alpha)T_i \quad (16)$$

3.4 วิธีค้นหาแบบฝูงอนุภาคเชิงผสมผสาน

การปรับปรุง PSO ด้วย GA และ SA ในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า วิธีค้นหาแบบฝูงอนุภาคเชิงผสมผสาน (Hybrid Particle Swarm Optimization: Hybrid PSO) และมีลำดับขั้นตอนการทำงานแสดงในรูปที่ 2 โดยแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ก่อนใช้งานได้แก่ จำนวนอนุภาค (N_{max}) ค่า T_i เริ่มต้น ค่า α และเงื่อนไขหยุดการทำงาน
- 2) กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้กับอนุภาคแต่ละตัวด้วยการสุ่มแบบวงกว้างให้มีจำนวนเท่ากับ N_{max}
- 3) อนุภาคแต่ละตัวพิจารณาตำแหน่งใหม่โดยใช้สมการที่ (14)
- 4) พิจารณาการสลับตำแหน่งใหม่ตามแนวคิดการไขว้สายพันธุ์และกลายพันธุ์ของ GA ตามสมการที่ (10) และ (12)
- 5) ประเมินค่าความเหมาะสมของตำแหน่งใหม่ของอนุภาคแต่ละตัวโดยใช้สมการเป้าหมาย จากนั้น คำนวณค่าโอกาสการถูกรับเลือก Pr_i จากสมการที่ (15)
- 6) นำค่า Pr_i ของตำแหน่งใหม่ของอนุภาคแต่ละตัวเปรียบเทียบกับค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งถ้าค่า Pr_i มีค่ามากกว่าค่าสุ่ม ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 7 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 8
- 7) อนุภาคมีการเปลี่ยนตำแหน่งโดยเคลื่อนย้ายจากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่
- 8) ลดอุณหภูมิลงโดยใช้สมการที่ (16)
- 9) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าโปรแกรมทำงานสอดคล้องกับเงื่อนไขการหยุด ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 11 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 10
- 10) ค้นหาอนุภาคที่อยู่ในตำแหน่งที่แย่ที่สุดแล้วย้ายอนุภาคนั้นให้ไปอยู่ในตำแหน่งบริเวณรอบๆ อนุภาคที่อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด
- 11) แสดงผลคำตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งประกอบด้วยผลของตัวแปรออกแบบและคำตอบตามสมการเป้าหมาย



รูปที่ 2 ลำดับการทำงานของ Hybrid PSO

4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

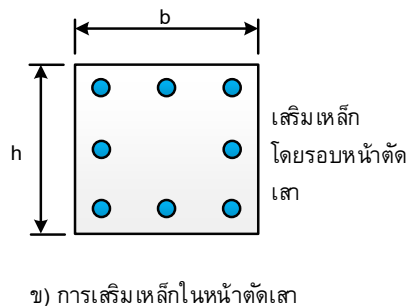
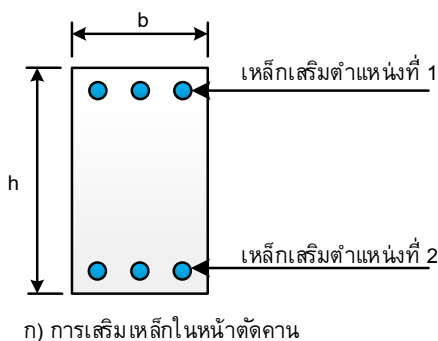
4.1 ขอบเขตการออกแบบ

ขอบเขตการออกแบบของโปรแกรมที่พัฒนาแสดงในตารางที่ 1 เมื่อกำลังอัดคอนกรีต (f_c) ที่สามารถเลือกได้คือ 180 210 240 280 300 320 และ 350 กก./ชม.² กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของ เหล็กเสริม (f_y) คือ 3,000 4,000 และ 5,000 กก./ชม.² ขนาดของคานและเสามีตั้งแต่ขนาด 20x20 ซม. ไปจนถึง 100x100 ซม. โดยปรับเพิ่มครั้งละ 5 ซม. เหล็กเสริมที่เลือกใช้ได้ประกอบด้วยเหล็ก ขั้วอ้อยขนาด 12 16 20 25 28 32 36 และ 40 มม. จำนวนของเหล็กเสริมแต่ละชั้นในหน้าตัดคาน กำหนดได้ตั้งแต่ 2 ถึง 12 เส้นต่อชั้น โดยปรับเพิ่มครั้งละ 1 เส้น สำหรับในหน้าตัดเสาสามารถ กำหนดใช้ได้ตั้งแต่ 4 ถึง 24 เส้น โดยปรับเพิ่มครั้งละ 2 เส้น

รูปแบบการเสริมเหล็กในชิ้นส่วนโครงสร้างคานและเสาในงานวิจัยนี้กำหนดใช้ตามรูปที่ 3 หน้า ตัดมีด้านแคบเท่ากับ b และมีความลึกเท่ากับ h การเสริมเหล็กในคานกำหนดให้เป็นไปตามรูปที่ 3 ก) โดยแบ่งออกเป็น 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งที่ 1 เป็นการเสริมเหล็กตำแหน่งด้านบนเพื่อ ต้านทานโมเมนต์ดัดลบที่เกิดขึ้นและตำแหน่งที่ 2 เสริมตำแหน่งด้านล่างเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัด บวกที่เกิดขึ้น สำหรับการเสริมเหล็กในหน้าตัดเสากำหนดให้เป็นไปตามรูปที่ 3 ข) มีลักษณะเสริม เหล็กยื่นโดยรอบหน้าตัด

ตารางที่ 1 ขอบเขตการออกแบบโครงสร้างเสาและคานที่กำหนดใช้สำหรับทดสอบ

ตัวแปรออกแบบ	ค่าต่ำสุด	ปรับเพิ่ม	ค่าสูงสุด	หน่วย
กำลังอัดคอนกรีต (f'_c)	180	-	350	กก./ซม. ²
แรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (f_y)	3,000	1,000	5,000	กก./ซม. ²
ด้านแคบของหน้าตัด (b)	20	5	100	ซม.
ด้านลึกของหน้าตัด (h)	20	5	100	ซม.
ขนาดของเหล็กเสริม	12	-	40	มม.
จำนวนเหล็กเสริมด้านบนและล่างในคาน	2	1	12	เส้น
จำนวนเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดเสา	4	2	24	เส้น



รูปที่ 3 รูปแบบการเสริมเหล็กในชิ้นส่วนโครงสร้าง

4.2 สมการเป้าหมายและราคาที่ใช้ในงานวิจัย

สมการเป้าหมายที่ใช้สำหรับทดสอบ Hybrid PSO คือ สมการผลรวมของราคาค่าก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำให้ผลการออกแบบมีราคาที่เหมาะสมที่สุดดังสมการที่ (17) ซึ่งสมการนี้ประกอบด้วยราคาและปริมาณของวัสดุจำนวน 3 ชนิดได้แก่ คอนกรีต เหล็กเสริมและแบบหล่อ

$$F_{\text{cost}} = \text{Min} \sum L(V_C C_C + V_S C_S + V_F C_F) \quad (17)$$

เมื่อ F_{cost} คือ สมการเป้าหมายหรือสมการราคาของโครงสร้าง (บาท) L คือ ความยาวของชิ้นส่วน (ม.) V_C คือ ปริมาณคอนกรีต (ม.³) C_C คือ ราคาคอนกรีต (บาท/ม.³) V_S คือ ปริมาณเหล็ก

เสริม (กก.) C_s คือ ราคาเหล็กเสริมคอนกรีต (บาท/กก.) V_f คือ ปริมาณแบบหล่อ (m^2) และ C_f คือ ราคาของแบบหล่อ (บาท/ m^2)

สำหรับราคาวัสดุก่อสร้างเลือกใช้ของกรุงเทพมหานคร (ราคาเงินสด ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม ไม่รวมค่าขนส่ง) ประจำเดือน ธันวาคมปี 2560 [19] ราคาคอนกรีตกำลังอัด 240 กก./ชม.² รูปทรงกระบอก 2,193 บาท/ m^3 ค่าแรงเทคอนกรีต 485 บาท/ m^3 รวมเป็นเงิน 2,678 บาท/ m^3 ราคาเหล็กคุณภาพ SD40 เท่ากับ 19.2 บาท/กก. ค่าแรงติดตั้งเหล็ก 3.3 บาท/กก. รวม 22.5 บาท/กก. ราคาไม้แบบ 405 ค่าแรงติดตั้งแบบ 155 บาท/ m^2 รวม 560 บาท/ m^2

4.3 การประยุกต์ใช้ Hybrid PSO สำหรับออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

Hybrid PSO ที่พัฒนาสำหรับออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4 ซึ่งก่อนการใช้งาน ต้องกำหนดรูปทรงของโครงสร้าง แรงที่กระทำในแต่ละกรณี (Load case) หลังจากนั้นโปรแกรมจะวิเคราะห์แรงภายในโครงสร้างที่เกิดขึ้นและเริ่มทำงานตามขั้นตอนดังนี้

1) เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นก่อนการใช้งานซึ่งประกอบด้วย N_{max} T_i α และจำนวนการซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด (Rp_{max})

2) เริ่มที่การพิจารณาคำตอบลำดับที่ i โดยเริ่มจากการสุ่มตัวแปรออกแบบคานและเสาเพื่อสร้างคำตอบที่เป็นไปได้จากขอบเขตของตัวแปรออกแบบ จากนั้น ผลคำตอบที่สุ่มได้จะถูกนำไปคำนวณกำลังรับน้ำหนักพร้อมกับคำนวณราคารวมของโครงสร้าง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทราบว่าทุกผลการออกแบบรับกำลังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยและเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบที่ถูกกำหนดไว้

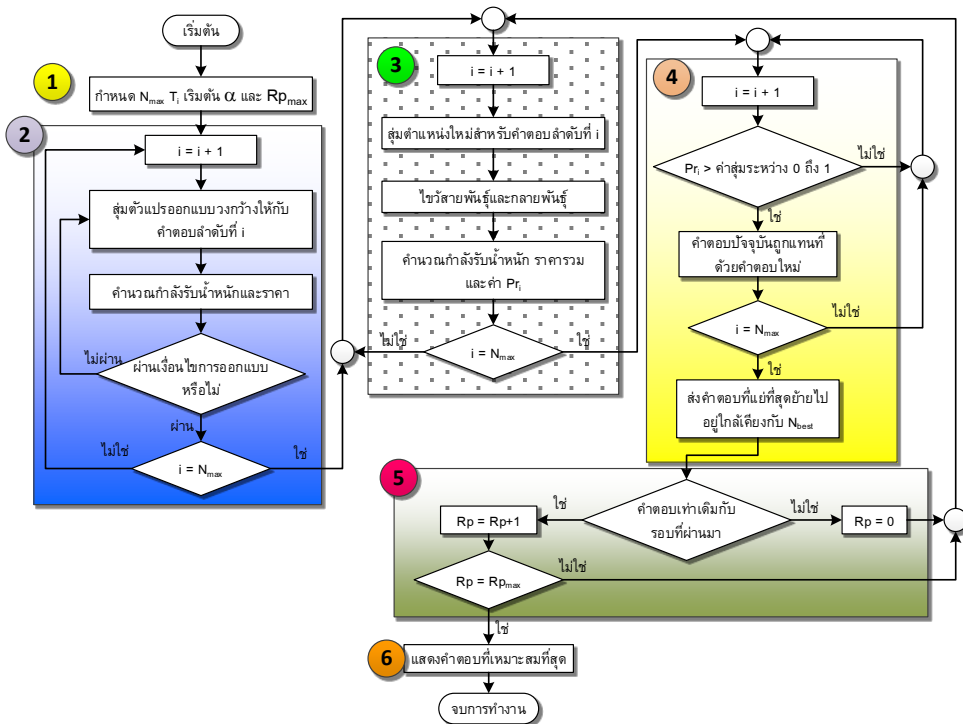
3) สร้างคำตอบใหม่ให้มีจำนวนเท่ากับรอบที่ผ่านมาโดยพิจารณาจากสมการที่ (14) จากนั้นคำตอบใหม่ถูกสับเปลี่ยนอีกครั้งด้วยสมการที่ (10) และสมการที่ (12) ตามความน่าจะเป็นจากสมการที่ (11) และสมการที่ (13) ต่อมาคือการคำนวณกำลังรับน้ำหนัก ราคารวมและค่าความน่าจะเป็น Pr_i ตามลำดับ

4) คำตอบใหม่ทุกคำตอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับคำตอบเดิมทั้งหมดโดยพิจารณาจากความสามารถในการรับน้ำหนัก มาตรฐานการออกแบบและค่า Pr_i ที่เปรียบกับค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งถ้าหากคำตอบใหม่สามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย ผ่านมาตรฐานการออกแบบและค่า Pr_i มากกว่าค่าสุ่ม ผลคำตอบนั้นจะแทนที่คำตอบเดิมทันที แต่ถ้าไม่ใช่ สถานะคำตอบเดิมจะยังคงอยู่ จากนั้น ค้นหาตำแหน่งของคำตอบที่แย่ที่สุดในกลุ่มและย้ายให้มาอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของ N_{best}

5) หากผลคำตอบใหม่ที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่มมีค่าเท่ากับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในรอบที่ผ่านมา จำนวนการทำซ้ำคำตอบที่เหมาะสม (Rp) จะเพิ่มขึ้น 1 ระดับ แต่ถ้าไม่ใช่ ค่า Rp จะเท่ากับ

0 ทันที จากนั้นจึงจะตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดตามที่กำหนดไว้ นั่นคือ ถ้า R_p เท่ากับ $R_{p_{max}}$ ให้หยุดการทำงานทันที แต่ถ้าไม่ใช่ ให้กลับไปทำต่อในลำดับที่ 3

6) แสดงผลการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมพร้อมกับรายการคำนวณและราคา



รูปที่ 4 ลำดับการทำงานของโปรแกรม Hybrid PSO สำหรับออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม

5. ตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวอย่างอาคาร แรงภายนอกที่กระทำและคุณสมบัติวัสดุเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kaveh และ Sabzi [11] นั่นคือ กำหนดใช้ตัวคูณเพิ่มแรงกระทำจากภายนอกตามมาตรฐาน ACI318-08 [14] ดังสมการที่ (18) ถึง (20) โดยน้ำหนักที่กระทำ (U) ประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) น้ำหนักบรรทุกจร (LL) และแรงแผ่นดินไหว (EQ) เมื่อ DL เท่ากับ 22.3 กิโลนิวตัน/ม. และ LL เท่ากับ 10.7 กิโลนิวตัน/ม. สำหรับ f_c กำหนดเท่ากับ 23.5 เมกะปาสกาล (240 กก./ซม.²) f_y เท่ากับ 392 เมกะปาสกาล (4,000 กก./ซม.²) ในขณะที่ขนาดเหล็กเสริมในหน้าตัดคานของ Kaveh และ Sabzi [11] กำหนดใช้เท่ากับ 22 และ 19 มม. ซึ่งในเมืองไทยไม่มีเหล็กเสริมขนาดดังกล่าวในค่าของ f_y ที่กำหนด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เหล็กขนาด 20 และ 16 มม. ที่มีขนาดใกล้เคียงแทน

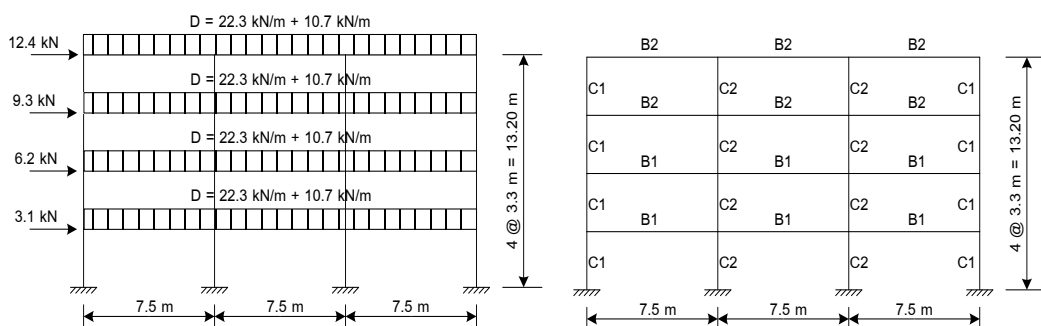
$$U = 1.2D + 1.6L \quad (18)$$

$$U = 1.2D + 1.0L + 1.4E \quad (19)$$

$$U = 0.9D + 1.4E \quad (20)$$

5.1 ตัวอย่างทดสอบ

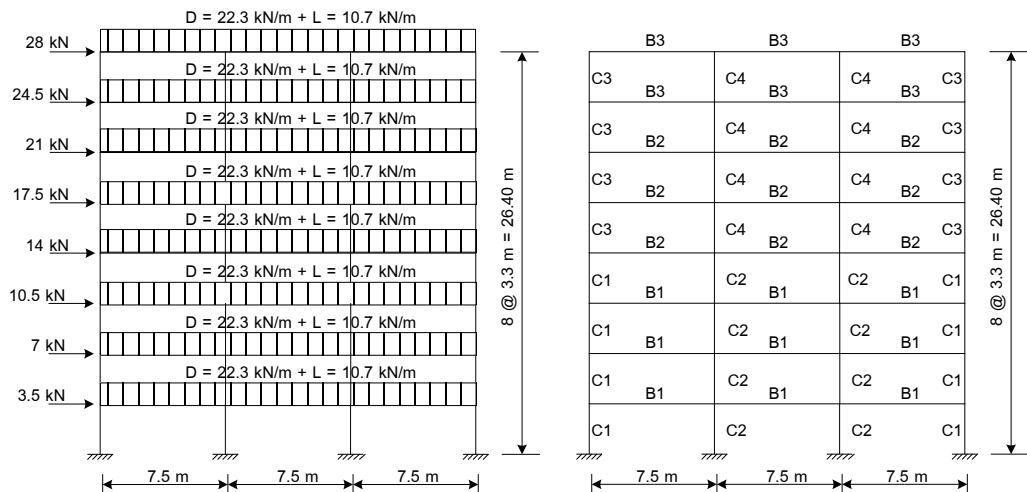
ตัวอย่างที่ 1 คือ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 3 ช่วง จำนวน 4 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยจำนวนชิ้นส่วนทั้งหมด 28 ชิ้นส่วน ความสูง 13.20 ม. สูงชั้นละ 3.3 ม. ความห่างของเสา 7.50 ม. เป็นโครงสร้างเสาจำนวน 16 ชิ้นส่วน โครงสร้างคานจำนวน 12 ชิ้นส่วน แบ่งออกเป็นกลุ่มของเสาจำนวน 2 กลุ่ม ได้แก่ C1 และ C2 และแบ่งเป็นกลุ่มของคานจำนวน 2 กลุ่ม ได้แก่ B1 และ B2 โดยมีแรงแผ่นดินไหวกระทำด้านข้างดังรูปที่ 5 ซึ่งจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้มีจำนวนเท่ากับ $(2 \times 16 \times 16 \times 10) \times (2 \times 16 \times 16 \times 5 \times 5) = 6.55 \times 10^7$ คำตอบ นั่นคือ จำนวนกลุ่มคาน 2 กลุ่ม $\times$ b (16 ค่า) $\times$ h (16 ค่า) $\times$ จำนวนเหล็กเสริม (10 ค่า) $\times$ จำนวนกลุ่มเสา 2 กลุ่ม $\times$ b (16 ค่า) $\times$ h (16 ค่า) $\times$ จำนวนเหล็กเสริม (10 ค่า)



รูปที่ 5 ตัวอย่างที่ 1 โครงข่าย 3 ช่วง 4 ชั้น

ตัวอย่างที่ 2 คือ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 3 ช่วง จำนวน 8 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยจำนวนชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมด 56 ชิ้นส่วน ความสูงของอาคาร 26.40 ม. สูงชั้นละ 3.30 ม. มีความห่างของช่วงเสา 7.50 ม. แบ่งออกเป็นโครงสร้างเสาจำนวน 32 ชิ้นส่วน โครงสร้างคานจำนวน 24 ชิ้นส่วน และแบ่งออกเป็นกลุ่มสำหรับออกแบบได้แก่ กลุ่มของเสาจำนวน 4 กลุ่มคือ C1 ถึง C4 และกลุ่มของคานคือ B1 ถึง B3 โดยมีแรงแผ่นดินไหวกระทำด้านข้างดังรูปที่ 6 ซึ่งมีคำตอบที่เป็นไปได้เท่ากับ $(3 \times 16 \times 16 \times 5 \times 5) \times (4 \times 16 \times 16 \times 10) = 1.97 \times 10^8$ คำตอบ นั่นคือ จำนวนกลุ่มคาน 3

กลุ่ม x b (16 ค่า) x h (16 ค่า) x จำนวนเหล็กเสริม (10 ค่า) x จำนวนกลุ่มเสา 4 กลุ่ม x b (16 ค่า) x h (16 ค่า) x จำนวนเหล็กเสริม (10 ค่า)



รูปที่ 6 ตัวอย่างที่ 2 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง 8 ชั้น

5.2 วิธีการทดสอบ

ในการใช้งาน Hybrid PSO จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้แก่ N_{max} , T_i , α และ R_{pmax} ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า N_{max} เท่ากับ 100 ตัว T_i เท่ากับราคาของคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานแรก α เท่ากับร้อยละ 20 และ R_{pmax} เท่ากับ 60 ครั้ง เนื่องจากค่าเหล่านี้ได้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อทดสอบในห้องทดลอง จากนั้นทำการทดสอบออกแบบตัวอย่างละ 25 ครั้ง และใช้สถิติ t-test วัดค่าความแตกต่างของราคาเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างกับคำตอบที่มีราคาต่ำสุดที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 โดยกำหนดสมมติฐานหลัก (H_0) คือ ประชากรที่มีราคาต่ำสุดมีค่าเท่ากับราคาเฉลี่ยของกลุ่มประชากร และสมมติฐานรอง (H_1) คือ ประชากรที่มีราคาต่ำสุดมีค่าแตกต่างจากราคาเฉลี่ยของกลุ่มประชากร เมื่อค่า t วิฤตที่เปิดได้จากตารางค่าสถิติมีค่าเท่ากับ 2.49

6. ผลการทดสอบ

6.1 ผลการทดสอบทางสถิติแต่ละตัวอย่าง

ผลการทดสอบทางสถิติของทั้ง PSO และ Hybrid PSO เมื่อทดสอบออกแบบจำนวนตัวอย่างละ 25 ครั้งแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ผลการทดสอบทางสถิติของ Hybrid PSO ได้รับราคาเฉลี่ยที่ดีกว่า PSO ประมาณร้อยละ 2 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าในทุกตัวอย่างประมาณ 5 เท่า

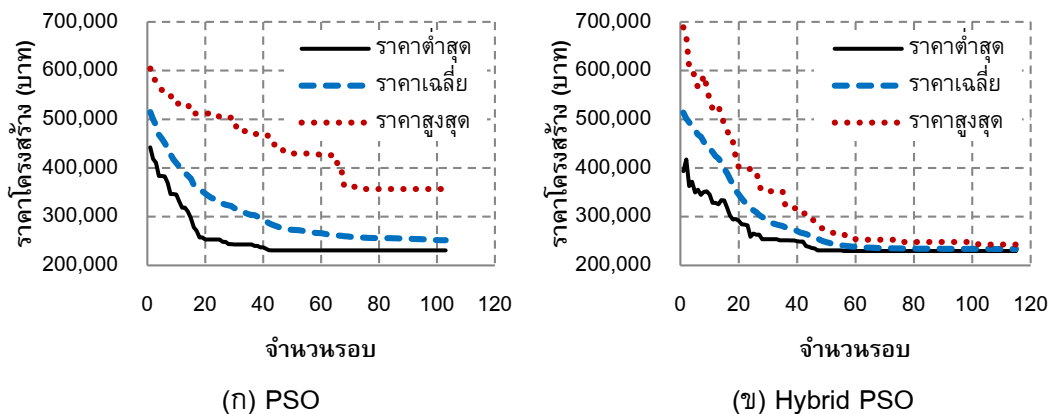
นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ t ของ Hybrid PSO พบว่า ค่าสถิติ t น้อยกว่า t วิกฤติทุกตัวอย่าง ดังนั้น จึงยอมรับสมมติฐานหลักที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ทุกตัวอย่างทดสอบ ในขณะที่ PSO กลับได้ผลลัพธ์ตรงกันข้ามทุกตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบทางสถิติของ PSO และ Hybrid PSO

วิธีการ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2	
	PSO	Hybrid PSO	PSO	Hybrid PSO
	ราคา (บาท)	ราคา (บาท)	ราคา (บาท)	ราคา (บาท)
ค่าต่ำสุด	229,633	229,633	491,993	491,993
ค่าสูงสุด	256,748	234,211	541,351	505,726
ค่าเฉลี่ย	236,531	230,380	503,806	493,022
*STDEV	8,322	1,605	13,392	3,253
ค่า t วิกฤต	2.49	2.49	2.49	2.49
ค่าสถิติ t	4.06	2.28	4.32	1.55
ผลการวิเคราะห์	ปฏิเสธ H_0	ยอมรับ H_0	ปฏิเสธ H_0	ยอมรับ H_0

หมายเหตุ *STDEV คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ * $t(s)$ คือ เวลา (วินาที)

ลักษณะการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของ PSO และ Hybrid PSO สำหรับตัวอย่างที่ 1 แสดงในรูปที่ 7 พบว่า การลู่ของ PSO ตามรูปที่ 7 (ก) มีลักษณะลู่ลงเมื่อค้นพบค่าตอบที่เหมาะสมกว่าเพียงอย่างเดียวและเส้นกราฟราคาต่ำสุดกับราคาสูงสุดมีความห่างกันมากนั้นแสดงว่ามีสมาชิกภายในฝูงบางตัวที่เคลื่อนที่ไม่ทันฝูง ในขณะที่ Hybrid PSO ไม่ได้ลู่ลงเพียงอย่างเดียว แต่จะลู่เข้าในช่วงต้นเพื่อพาฝูงค้นหาค่าตอบอย่างทั่วถึงก่อนในขณะที่อุณหภูมิยังคงเหลือ จากนั้น เมื่ออุณหภูมิใกล้หมดจึงลู่ลงก่อนจะเป็นเส้นตรงในช่วงปลายก่อนหยุดการทำงานดังรูปที่ 7 (ข) นอกจากนี้ ความห่างของราคาต่ำสุดกับราคาสูงสุดมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมากในช่วงปลายนั้นแสดงว่า Hybrid PSO มีการค้นหาค่าตอบที่อยู่กันเป็นกลุ่มมากกว่าโดยไม่ทิ้งตัวใดตัวหนึ่งไว้ข้างหลัง



รูปที่ 7 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม

6.2 ผลการออกแบบที่เหมาะสม

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1 แสดงในตารางที่ 3 พบว่า PSO และ Hybrid PSO มีความประหยัดมากกว่า HPSACO และ HBB-BC [11] ร้อยละ 2.82 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PSO และ Hybrid PSO สามารถออกแบบโครงสร้างที่ประหยัดกว่าได้แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม โดยที่โครงสร้างนั้นยังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 1

วิธีการ	PSO และ Hybrid PSO			HPSACO [11]			HBB-BC [11]		
กลุ่ม	ขนาดหน้าตัด	เหล็กเสริม		ขนาดหน้าตัด	เหล็กเสริม		ขนาดหน้าตัด	เหล็กเสริม	
		บน	ล่าง		บน	ล่าง		บน	ล่าง
B1	35x50	5-DB20	4-DB16	30x50	5-D22	3-D19	30x50	5-D22	3-D19
B2	30x55	5-DB20	4-DB16	30x50	5-D22	4-D19	30x50	5-D22	4-D19
C1	35x35	6-DB25		35x35	8-D25		35x35	8-D25	
C2	35x35	4-DB25		30x30	6-D25		30x30	6-D25	
ราคา	229,633 บาท			236,339 บาท			236,339 บาท		
	-			ต่างกันร้อยละ 2.82			ต่างกันร้อยละ 2.82		

ตารางที่ 4 แสดงผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 2 ซึ่งพบว่า ผลการออกแบบในงานวิจัยนี้มีขนาดหน้าตัดโครงสร้างและปริมาณเหล็กเสริมในกลุ่มของเสาที่น้อยกว่างานวิจัยที่เปรียบเทียบ จึงทำให้มีความประหยัดมากกว่าร้อยละ 4.29 และ 4.82 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 2

วิธีการ	PSO และ Hybrid PSO			HPSACO [11]			HBB-BC [11]		
กลุ่ม	ขนาดหน้าตัด	เหล็กเสริม		ขนาดหน้าตัด	เหล็กเสริม		ขนาดหน้าตัด	เหล็กเสริม	
		บน	ล่าง		บน	ล่าง		บน	ล่าง
B1	30x60	5-DB20	4-DB16	30x50	6-D22	3-D19	30x50	6-D22	3-D19
B2	35x50	6-DB20	4-DB16	30x50	6-D22	3-D19	30x50	6-D22	3-D19
B3	30x55	5-DB20	4-DB16	30x50	5-D22	3-D19	30x50	5-D22	3-D19
C1	35x35	6-D25		40x40	8-D25		40x40	8-D25	
C2	50x50	6-D25		50x50	8-D25		45x45	12-D25	
C3	35x35	6-D25		35x35	8-D25		35x35	8-D25	
C4	35x35	4-D25		35x35	8-D25		35x35	8-D25	
ราคา	491,993 บาท			514,049 บาท			516,890 บาท		
	-			ต่างกันร้อยละ 4.29			ต่างกันร้อยละ 4.82		

7. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาารูปแบบผสมผสานของ PSO กับ GA และ SA สำหรับแก้ปัญหาการออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ชื่อว่า Hybrid PSO ซึ่งจากการทดสอบพบว่า Hybrid PSO สามารถออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมได้ยิ่งกว่านั้น การเลือกใช้ค่า T_i เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 100 ของราคาคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มรอบแรก ค่า α เท่ากับร้อยละ 20 ค่า N_{max} เท่ากับ 100 ตัว และค่า Rp_{max} เท่ากับ 60 ครั้ง ส่งผลให้ Hybrid PSO ได้รับผลการทดสอบทางสถิติพื้นฐานที่ดีกว่า PSO แบบดั้งเดิมทุกตัวอย่างโดยที่ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ให้ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติ t ที่ยอมรับสมมติฐานหลักที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ทุกตัวอย่างในขณะที่ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

8. การทำวิจัยในครั้งต่อไป

สำหรับงานวิจัยในครั้งต่อไป จะทดลองประยุกต์ใช้วิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมแบบผสมผสานนี้สำหรับออกแบบโครงสร้างอื่นที่มีรูปแบบหลากหลายมากขึ้นเพื่อให้มั่นใจว่า วิธีการนี้มีความเหมาะสมต่อการใช้ออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขต ขอนแก่น ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Assanai T, Alongkorn L, Raungrut C. Optimum design of reinforced concrete rectangular column using hill climbing algorithm. R & D J EIT 2012;23:28-35.
- [2] Govindaraj V, Ramasamy J. Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms. Comput Struct 2005;84:34-48.
- [3] Camp C, Pezeshk S, Hansson H. Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm. J Struct Eng 2003;129:105-15.
- [4] Koyama K, Shikada K. Optimum design of concrete slab using genetic algorithm. Comput Aided Optim Struct 1997;31:101-10.
- [5] Camp C, Pezeshk S, Hansson H. Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm. J Struct Eng 2003;129:105-15.
- [6] Assanai T, Raungrut C. Optimal parameters and performance of artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames. Eng Struct 2017;151:802-20.
- [7] Kaveh A, Sabzi O. Optimal design of reinforced concrete frames using big bang-big crunch algorithm. Int J Civil Eng 2012;10:189-200.
- [8] Akin A, Saka MP. Harmony search algorithm based optimum detailed design of reinforced concrete plane frames subject to ACI 318-05 provisions. Comput Struct 2015;147:79-95.
- [9] Gholizadeh S, Aligholizadeh V. Optimum design of reinforced concrete frames using bat meta-heuristic algorithm. Int J Civil Eng 2013;3:483-97.

- [10] Shimpi SJ, Ritu T, Harish S, Jagdish CB. Hybrid Artificial Bee Colony algorithm with Differential Evolution. Appl Soft Comput 2017;58:11-24.
- [11] Kaveh A, Sabzi O. A comparative study of two meta-heuristic algorithms for optimum design of reinforced concrete frames. Int J Civil Eng 2011;9:193-206.
- [12] García-Segura T, Yepes V, Alcalá J, Pérez-López E. Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges. Eng Struct 2015;92:112-22.
- [13] Rajeev G, Raman M. A hybrid of ant colony and firefly algorithms (HAFA) for solving vehicle routing problems. J Comput Sci 2018;25:28-37.
- [14] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-08). America; 2008.
- [15] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. Proceedings of IEEE international conference on neural networks; 1995 Nov 27 - Dec 1; The University of Western Australia, Perth, Western Australia; 1995. p. 1942-8.
- [16] Beyer H, Schwefel H. Evolution strategies: a comprehensive introduction. J Nat Comput 2002;1:3-52.
- [17] Gandomi A, Alavi A. Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm. Commun Nonlinear Sci Numer Simul 2012;17:4831-45.
- [18] Kirkpatrick S, Gelatt C, Vecchi M. Optimization by Simulated Annealing. Science 1983; 220:671-80.
- [19] Committee of construction cost. Accounting for construction materials and labor costs (2017). Bangkok; 2017.

ประวัติผู้เขียนบทความ



อาจารย์ ดร.อัสนัย ทาภา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตขอนแก่น E-Mail: assanai.tapao@gmail.com



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุทธ์ ชีระโรจน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
E-Mail: raungrut.c@msu.ac.th

Article History:

Received: December 12, 2018

Revised: January 22, 2019

Accepted: March 13, 2019