

# การออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาคตามมาตรฐาน ACI318-08

## Optimum Design of Reinforced Concrete Frames using Particle Swarm Optimization According ACI318-08

อศนัย ทาภา เรืองรุชดี ชีระโรจน์

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีฝูงอนุภาค (PSO) เพื่อออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ACI318-08 และหาราคาต่ำสุดของโครงสร้าง สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมถูกพัฒนาโดยโปรแกรม Microsoft visual basic 6 จากนั้น ประสิทธิภาพการออกแบบของวิธีฝูงอนุภาคถูกทดสอบโดยใช้ตัวอย่างโครงข้อแข็งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งคำตอบที่เหมาะสมของวิธีฝูงอนุภาคจะถูกเปรียบเทียบกับวิธีจำลองการระเบิดของจักรวาล (HBB-BC) และวิธีฝูงอนุภาคผสมวิธีฝูงมด (HPSACO) โดยจากผลการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีฝูงอนุภาคสามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบที่เหมาะสมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กได้และมีความประหยัดกว่า HPSACO และ HBB-BC อยู่ในช่วงร้อยละ 0.28 - 7.31 และในช่วงร้อยละ 0.28 - 5.02 ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** การออกแบบที่เหมาะสม โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีฝูงอนุภาค

### Abstract

This research presents the application of particle swarm optimization (PSO) to design the reinforced concrete frames according ACI318-08 and determine the minimum cost of reinforced concrete structure. Structural analysis and design procedure were developed by Microsoft visual basic 6. Then, the design performance of PSO was tested by three examples from the related literature. The optimal solution of PSO is compared with heuristic big bang-big crunch (HBB-BC) and heuristic particle swarm ant colony optimization (HPSACO). The results indicated that the PSO can be applied with optimal design of reinforced concrete frames according ACI318-08 and had more saving cost than HPSACO and HBB-BC between 0.28 -7.31% and 0.28-5.02%, respectively.

**Keywords:** Optimum design, Reinforced concrete frames, Particle swarm optimization

## 1. บทนำ

การออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมคือ การออกแบบโครงสร้างให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมกับแรงที่กระทำ โดยที่โครงสร้างนั้นยังสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย ผ่านมาตรฐานการออกแบบและมีราคาต่ำก่อสร้างต่ำที่สุด [1] ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่ผู้ออกแบบจะทราบถึงรูปแบบของคำตอบที่เหมาะสมอันเนื่องมาจากจำนวนตัวแปรและชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งมีเป็นจำนวนมาก อีกทั้งการออกแบบโดยทั่วไปมีข้อจำกัดในหลายๆ ตัวแปร ผู้ออกแบบจึงมักพิจารณาเฉพาะกำลังรับน้ำหนักเป็นสำคัญโดยไม่ได้นำถึงราคาก่อสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปตามกลไกของตลาด ซึ่งจากปัญหาดังกล่าว ทำให้ในหลายงานวิจัยได้เลือกใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่อแก้ไขปัญหการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน [2-5]

วิธีฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization : PSO) คือวิธีการแก้ไขปัญหาค่าเหมาะที่สุดวิธีหนึ่งที่มีขั้นตอนการทำงานไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อน ซึ่งมีลักษณะการค้นหาคำตอบแบบสุ่มโดยอาศัยการค้นหาคำตอบแบบฝูงช่วยเหลือซึ่งกันและกัน โดยผลคำตอบที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและขอบเขตการค้นหา (Search space) ของแต่ละปัญหาที่ต้องกำหนด [6] ด้วยเหตุนี้ PSO จึงเป็นที่นิยมเพื่อใช้แก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดหลายๆ ปัญหา รวมถึงปัญหการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมทางวิศวกรรมด้วย สำหรับการใช้ PSO เพื่อแก้ไขปัญหการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมเริ่มต้นจาก Li และคณะ [7] และ Ghoddosian และ Sheikhi [8] ได้แสดงให้เห็นว่า PSO สามารถประยุกต์ใช้ออกแบบโครงข้อหมุนแบบ 2 มิติและ 3 มิติได้ดีกว่าวิธีการอื่นที่ถูกเปรียบเทียบ ซึ่งต่อมา Nedushan และ Varace [9] ได้แสดงให้เห็นว่า PSO สามารถออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม โดยที่ผลการออกแบบจะเปลี่ยนแปลงตามราคาวัสดุในแต่ละท้องถิ่น และ Dogan และ Saka [10] ยังได้แสดงให้เห็นว่า PSO สามารถออกแบบโครงข้อแข็งเหล็ก (Steel frames) ตามวิธีการออกแบบ LRFD ที่มีความประหยัดมากกว่าวิธีค้นหาโดยใช้ความไพเราะของเสียง (Harmony search algorithm: HS)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า PSO ได้ถูกใช้เพื่อแก้ไขปัญหการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมในหลายๆ ปัญหา แต่ยังไม่พบว่า มีงานวิจัยใดเลือกใช้ PSO สำหรับออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ PSO เพื่อออกแบบที่เหมาะสมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI318-08 [11] และแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ PSO ด้วยการกำหนดใช้ตัวอย่างและเปรียบเทียบผลการออกแบบของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [12]

## 2. ข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ ACI318-08

### 2.1 ข้อกำหนดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ACI318-08 ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับตรวจสอบผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ดังนี้

- 1) กำลังรับโมเมนต์ดัดที่คานค้ำคานค้ำแล้ว ( $\phi M_u$ ) ต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่กระทำ ( $M_u$ )
- 2) ตัวคูณลดกำลังรับโมเมนต์ดัดของคาน ( $\phi$ ) มีค่าเท่ากับ 0.90 ตามข้อกำหนด 9.3.2.1
- 3) ความลึก ( $h$ ) ของหน้าตัดคานต้องมีค่ามากกว่าด้านแคบ ( $b$ ) แต่ต้องมีค่าไม่เกิน 3 เท่าของด้านแคบ
- 4) จำนวนเหล็กเสริมในหน้าตัดคานต้องมีอย่างน้อย 4 เส้นที่มุมของหน้าตัด
- 5) ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมในหน้าตัดคานต้องมีค่ามากกว่า 25 มม.
- 6) สัดส่วนของเหล็กเสริมในหน้าตัด ( $\rho$ ) ต้องมีค่ามากกว่าสัดส่วนของเหล็กเสริมขั้นต่ำ ( $\rho_{min}$ ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) แต่ต้องมีค่าไม่เกินสัดส่วนของเหล็กเสริมสูงสุดที่ยอมให้ ( $\rho_{max}$ ) ตามสมการที่ (2)

$$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y} \geq \frac{1.4}{f_y} \quad (1)$$

$$\rho_{max} = 0.75 \left( \frac{0.85\beta_1 f'_c (600)}{f_y (600 + f_y)} \right) \quad (2)$$

เมื่อ  $f'_c$  คือ กำลังอัดของคอนกรีต และ  $\beta_1$  คือ ค่าตัวคูณประกอบตามมาตรฐานการออกแบบซึ่งมีค่าไม่น้อยกว่า 0.65 แต่มีค่าไม่เกิน 0.85

## 2.2 ข้อกำหนดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ACI318-08 ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับตรวจสอบผลการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ดังนี้

1) กำลังรับน้ำหนักตามแนวแกนที่คูณค่าลดกำลังแล้ว ( $\phi P_n$ ) ต้องมีค่ามากกว่าแรงตามแนวแกนประลัยที่กระทำ ( $P_u$ )

2) กำลังรับโมเมนต์ดัดของเสาที่คูณค่าลดกำลังแล้วต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่กระทำ

3) ตัวคูณลดกำลังรับแรงตามแนวแกนและ โมเมนต์ดัดของเสา ( $\phi$ ) มีค่าเท่ากับ 0.65 ตามข้อกำหนด 9.3.2.2

4) จำนวนเหล็กเสริมในหน้าตัดต้องมีอย่างน้อย 4 เส้นที่มุมของหน้าตัด

5) ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมในหน้าตัดเสาต้องมีค่ามากกว่า 25 มม.

6) สัดส่วนของเหล็กเสริมในหน้าตัดต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 1 แต่ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 8 ของหน้าตัดเสา

## 3. วิธีฝูงอนุภาค

วิธีฝูงอนุภาค (PSO) ได้เลียนแบบพฤติกรรมกรรวมกลุ่มทางสังคมเพื่อออกหาอาหารของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติซึ่งถูกคิดค้นโดย Eberhart และ Kennedy [13] ในปี ค.ศ.1995 ด้วยการสังเกตลักษณะการบินของฝูงนกที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกันเป็นกลุ่มตลอดเวลาออกหาอาหาร PSO ได้กำหนดให้ฝูงนกเปรียบเสมือนฝูงอนุภาค (Particles) เคลื่อนที่ในปริภูมิค้นหา (Search space) อนุภาคแต่ละตัวจะมีการจดจำตำแหน่งปัจจุบัน ( $x_i$ ) ของตนเองไว้และมีการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ด้วยความเร็ว ( $v_i$ ) โกลัเคียงจำฝูง ( $P_{best}$ ) จากนั้น PSO จะค้นหาแหล่งอาหารใหม่อีกครั้งจนกว่าจะพบแหล่งอาหารที่ดีที่สุด [14] ตามขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มต้นด้วยการสร้างอนุภาคเริ่มต้นตามจำนวนที่ต้องการด้วยการสุ่มและกำหนดตำแหน่งของอนุภาคเป็นตำแหน่งปัจจุบัน

2. สุ่มสร้างตำแหน่งใหม่ให้กับอนุภาคแต่ละตัวด้วยการปรับความเร็วจากสมการที่ (3) และตำแหน่งใหม่ตามสมการที่ (4)

$$v_i = \mu_1 (P_i(t) - x_i(t)) + \mu_2 (P_{best}(t) - x_i(t)) \quad (3)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i \quad (4)$$

เมื่อ  $t$  คือ ช่วงเวลาใดๆ  $\mu_1$  และ  $\mu_2$  คือ ค่าสุ่มที่มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1

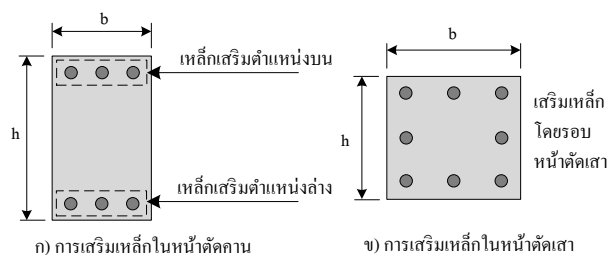
3. ตรวจสอบความเหมาะสมของตำแหน่งใหม่ ถ้าตำแหน่งใหม่ดีกว่าตำแหน่งปัจจุบัน ให้กำหนดตำแหน่งใหม่เป็นตำแหน่งปัจจุบันทันที

4. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดหรือจำนวนรอบการทำงาน ถ้าครบจำนวนรอบหรือเงื่อนไขหยุดการทำงาน ให้หยุดการทำงานทันที แต่ถ้าไม่เข้าเงื่อนไขใดเลยให้ทำต่อขั้นตอนที่ 2

## 4. วิธีดำเนินงานวิจัย

### 4.1 ขอบเขตของโปรแกรมที่พัฒนา

การวิจัยครั้งนี้ใช้คอมพิวเตอร์ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 7 หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i7-4500U CPU 1.80GHz หน่วยความจำแรม DDR3 7.89 GB และเลือกใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6.0 ในการพัฒนาระบบการออกแบบที่เหมาะสมโดยกำหนดให้หน้าตัดเสาและคานามีขนาดตั้งแต่ 200 x 200 มม. ถึง 1,000 x 1,000 มม. เสริมเหล็กตามรูปที่ 1 ตำแหน่งบนและล่างสำหรับคานและเสริมโดยรอบหน้าตัดสำหรับเสาโดยไม่พิจารณาออกแบบเหล็กปลอกรับแรงเฉือนตามงานวิจัยที่อ้างอิง [12]



รูปที่ 1 รูปแบบการเสริมเหล็กในหน้าตัด

### 4.2 สมการเป้าหมาย

เป้าหมายของการวิจัยครั้งนี้คือ การออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประหยัด ดังนั้น สมการเป้าหมายจึงเป็นสมการผลรวมราคาวัสดุ แบบหล่อและค่าแรงที่มีราคาต่ำสุดตามสมการที่ (5) โดยสมการนี้ถูกกำหนดใช้

ตรวจสอบผลการออกแบบร่วมกับมาตรฐานการออกแบบ ACI318-08 [11]

$$F = \text{Min} \sum_{i=1}^n L_i (V_c C_c + A_F C_F + W_s C_s) \quad (5)$$

เมื่อ  $F$  คือ ราคารวมของโครงข้อแข็ง  $L_i$  คือ ความยาวของชิ้นส่วนที่  $i$  ถึง  $n$   $V_c$  คือ ปริมาตรของคอนกรีต  $C_c$  คือ ราคารวมวัสดุและค่าแรงสำหรับงานคอนกรีต  $A_F$  คือ ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต  $C_F$  คือ ราคาแบบหล่อและค่าแรงสำหรับงานหล่อแบบ  $W_s$  คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม  $C_s$  คือ ราคารวมเหล็กเสริมและค่าแรงงาน

#### 4.3 ลำดับการทำงานของโปรแกรมวิธีฝูงอนุภาค

โปรแกรมที่พัฒนามีลำดับการทำงานดังรูปที่ 2 โดยในการใช้งานต้องกำหนดรูปแบบโครงสร้างและน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างก่อน หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มทำงานตามลำดับดังนี้

- 1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องก่อนการใช้งาน ได้แก่ คุณสมบัติวัสดุ ขนาดเหล็กเสริมในหน้าตัด จำนวนอนุภาค และเงื่อนไขการหยุด
- 2) สุ่มสร้างอนุภาคเริ่มต้นด้วยการสุ่มตัวแปรออกแบบให้กับอนุภาคแต่ละตัว
- 3) คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและราคาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับอนุภาค
- 4) ตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบ หากอนุภาคผ่านเงื่อนไขการออกแบบให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าไม่ผ่าน ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 2
- 5) ตรวจสอบจำนวนอนุภาค ถ้าอนุภาคมีจำนวนครบตามที่กำหนดให้ทำต่อขั้นตอนที่ 6 แต่ถ้ายังไม่ครบให้ทำต่อขั้นตอนที่ 2
- 6) ใช้สมการที่ (4) สุ่มตำแหน่งใหม่ให้กับอนุภาค
- 7) คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและราคาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับตำแหน่งใหม่
- 8) ตรวจสอบจำนวนตำแหน่งใหม่ ถ้าตำแหน่งใหม่ถูกสร้างครบตามที่กำหนดให้ทำต่อขั้นตอนที่ 9 แต่ถ้ายังไม่ครบให้ทำต่อขั้นตอนที่ 6

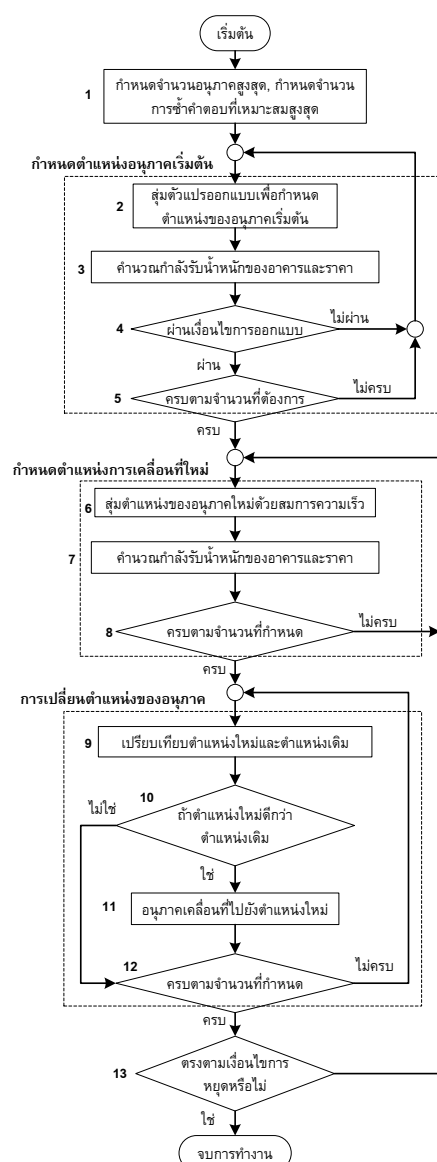
9) เปรียบเทียบตำแหน่งใหม่และตำแหน่งปัจจุบันด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และมาตรฐานการออกแบบ

10) ถ้าตำแหน่งใหม่ดีกว่าตำแหน่งเดิมให้ทำต่อขั้นตอนที่ 11 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 12

11) กำหนดตำแหน่งใหม่เป็นตำแหน่งปัจจุบันแล้วทำต่อขั้นตอนที่ 12

12) ตรวจสอบจำนวนการเลือกตำแหน่งใหม่ ถ้าครบตามจำนวนที่กำหนดให้ทำต่อขั้นตอนที่ 13 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 9

13) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าจำนวนการซ้ำของคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับที่กำหนดไว้ให้หยุดการทำงานทันที แต่ถ้าไม่ใช่ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 6



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธีฝูงอนุภาค

## 5. ตัวอย่างและผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้กำหนดใช้ตัวอย่าง แรงกระทำจากภายนอก และตัวแปรออกแบบเดียวกับงานวิจัยของ Kaveh [12] ซึ่งได้แก่ กำหนดใช้ตัวคูณเพิ่มแรงกระทำจากภายนอกตามมาตรฐาน ACI318-08 [11] ดังสมการที่ (6)-(8) กำหนดใช้กำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 23.5 เมกะปาสกาล แรงดึงของเหล็กเสริมเท่ากับ 392 เมกะปาสกาล ราคาคอนกรีตเท่ากับ 105 \$/ม.<sup>3</sup> ราคาเหล็กเสริม 0.9 \$/กก. ราคาแบบหล่อ 92 \$/ม.<sup>2</sup> และหยุดค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเมื่อไม่สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมกว่าจำนวน 20 ครั้ง

$$U = 1.2D + 1.6L \quad (6)$$

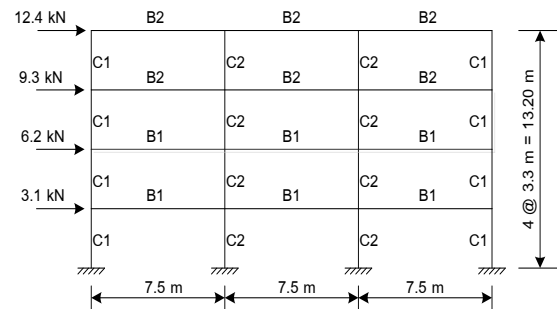
$$U = 1.2D + 1.0L + 1.4E \quad (7)$$

$$U = 0.9D + 1.4E \quad (8)$$

เมื่อ U คือ แรงกระทำจากภายนอก D คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Uniform dead load) L คือ น้ำหนักจร (Uniform live load) และ E คือ แรงแผ่นดินไหว (Earthquake load)

### 5.1 ตัวอย่างที่ 1 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง 4 ชั้น

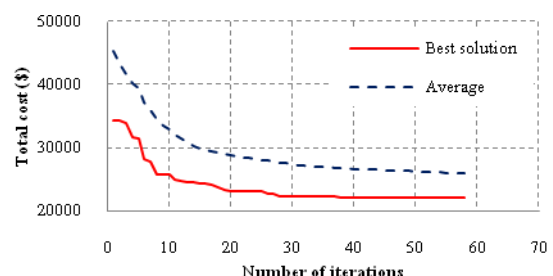
ตัวอย่างที่ 1 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง จำนวน 4 ชั้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมด 28 ชิ้นส่วน ถูกจำแนกกลุ่มเพื่อออกแบบโครงสร้างออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่ กลุ่มของเสา คือ C1 และ C2 และกลุ่มคาน คือ B1 และ B2 ดังที่แสดงในดังรูปที่ 3 สำหรับจำนวนอนุภาคสูงสุดของตัวอย่างนี้ได้กำหนดเท่ากับ 125 ตัว [12]



รูปที่ 3 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง 4 ชั้น สำหรับตัวอย่างที่ 1

ผลการทดสอบของตัวอย่างที่ 1 มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 4 ซึ่งเห็นได้ว่า PSO สามารถค้นพบคำตอบที่ดีขึ้นในทุกรอบการทำงานจนถึงรอบที่ 38 จากนั้นไม่สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมกว่าจนหยุดการทำงานในรอบที่ 58 โดยที่ราคาเฉลี่ยของกลุ่มประชากรในรอบสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 26,001 \$ และคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มประชากรมีราคาเท่ากับ 22,144 \$

สำหรับผลการออกแบบของคำตอบที่เหมาะสมได้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า PSO สามารถออกแบบโครงสร้างได้ประหยัดกว่า HPSACO และ HBB-BC เล็กน้อยร้อยละ 0.28 โดยใช้จำนวนรอบมากกว่า HPSACO จำนวน 23 รอบ แต่น้อยกว่า HBB-BC จำนวน 16 รอบ



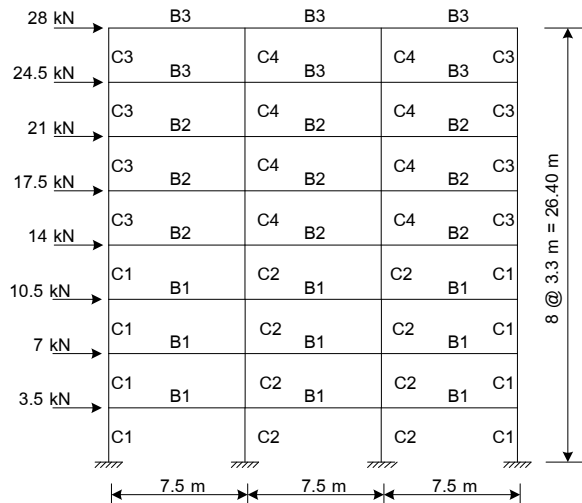
รูปที่ 4 การลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลการออกแบบของ PSO กับงานวิจัยของ Kaveh [12] สำหรับตัวอย่างที่ 1

| วิธีการ    |       | PSO                |                  |                |               | HPSACO [12]        |                  |                |               | HBB-BC [12]        |                  |                |               |
|------------|-------|--------------------|------------------|----------------|---------------|--------------------|------------------|----------------|---------------|--------------------|------------------|----------------|---------------|
| ชนิด       | กลุ่ม | ขนาดหน้าตัด        |                  | เหล็กเสริม     |               | ขนาดหน้าตัด        |                  | เหล็กเสริม     |               | ขนาดหน้าตัด        |                  | เหล็กเสริม     |               |
|            |       | ความกว้าง<br>(มม.) | ความลึก<br>(มม.) | โมเมนต์<br>บวก | โมเมนต์<br>ลบ | ความกว้าง<br>(มม.) | ความลึก<br>(มม.) | โมเมนต์<br>บวก | โมเมนต์<br>ลบ | ความกว้าง<br>(มม.) | ความลึก<br>(มม.) | โมเมนต์<br>บวก | โมเมนต์<br>ลบ |
| คาน        | B1    | 300                | 500              | 3-D19          | 5-D22         | 300                | 500              | 3-D19          | 5-D22         | 300                | 500              | 3-D19          | 5-D22         |
|            | B2    | 250                | 550              | 3-D19          | 4-D22         | 300                | 500              | 4-D19          | 5-D22         | 300                | 500              | 4-D19          | 5-D22         |
| เสา        | C1    | 300                | 300              | 10-D25         |               | 350                | 350              | 8-D25          |               | 350                | 350              | 8-D25          |               |
|            | C2    | 350                | 350              | 4-D25          |               | 300                | 300              | 6-D25          |               | 300                | 300              | 6-D25          |               |
| จำนวนรอบ   |       | 58                 |                  |                |               | 35                 |                  |                |               | 74                 |                  |                |               |
| ราคา (\$)  |       | 22,144             |                  |                |               | 22,207             |                  |                |               | 22,207             |                  |                |               |
| % ความต่าง |       | 0                  |                  |                |               | 0.28               |                  |                |               | 0.28               |                  |                |               |

## 5.2 ตัวอย่างที่ 2 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง 8 ชั้น

ตัวอย่างที่ 2 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง จำนวน 8 ชั้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมด 56 ชิ้นส่วน ถูกจำแนกกลุ่มเพื่อออกแบบโครงสร้างออกเป็น 7 กลุ่มได้แก่ กลุ่มของเสา คือ C1 C2 C3 และ C4 กลุ่มของคาน คือ B1 B2 และ B3 ดังที่แสดงในรูปที่ 5 สำหรับจำนวนอนุภาคสูงสุดของตัวอย่างนี้ได้กำหนดเท่ากับ 250 ตัว [12]

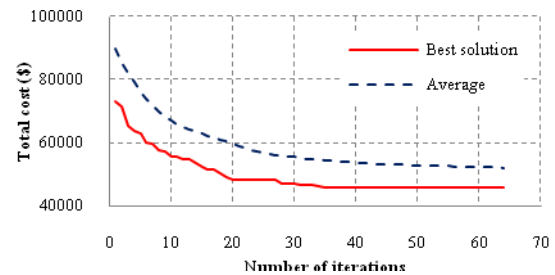


รูปที่ 5 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง 8 ชั้น สำหรับตัวอย่างที่ 2

ผลการทดสอบของตัวอย่างที่ 2 มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 6 ซึ่งดูเหมือนว่า PSO ลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมอย่างช้าๆ โดยที่คำตอบที่เหมาะสมที่พบในแต่ละ

ละรอบมีลักษณะคู่ขนานไปกับผลคำตอบเฉลี่ยในแต่ละรอบจนถึงรอบที่ 44 จากนั้น PSO ไม่สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมากกว่าจนหยุดการทำงานในรอบที่ 64 โดยที่ราคาเฉลี่ยของกลุ่มประชากรในรอบสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 52,096 \$ และคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มประชากรมีราคาเท่ากับ 45,841 \$

สำหรับผลการออกแบบของตัวอย่างที่ 2 แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า PSO สามารถออกแบบได้อย่างประหยัดกว่า HPSACO และ HBB-BC ร้อยละ 5.51 และ 5.02 ตามลำดับ โดยที่ใช้จำนวนรอบน้อยกว่า 42 และ 94 รอบ นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่า PSO สามารถออกแบบได้ประหยัดกว่าเมื่อจำนวนตัวแปรออกแบบเพิ่มมากขึ้น



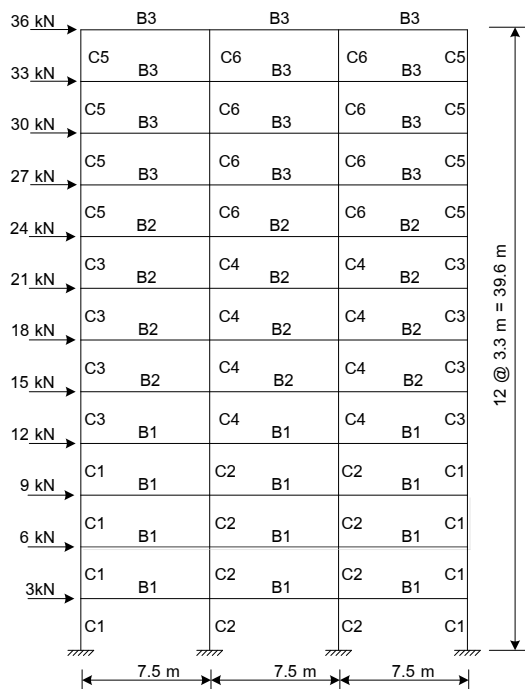
รูปที่ 6 การลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการออกแบบของ PSO กับงานวิจัยของ Kaveh [12] สำหรับตัวอย่างที่ 2

| วิธีการ    |       | PSO         |         |            |         | HPSACO [12] |         |            |         | HBB-BC [12] |         |            |         |
|------------|-------|-------------|---------|------------|---------|-------------|---------|------------|---------|-------------|---------|------------|---------|
| ชนิด       | กลุ่ม | ขนาดหน้าตัด |         | เหล็กเสริม |         | ขนาดหน้าตัด |         | เหล็กเสริม |         | ขนาดหน้าตัด |         | เหล็กเสริม |         |
|            |       | ความกว้าง   | ความลึก | โมเมนต์    | โมเมนต์ | ความกว้าง   | ความลึก | โมเมนต์    | โมเมนต์ | ความกว้าง   | ความลึก | โมเมนต์    | โมเมนต์ |
|            |       | ( มม.)      | ( มม.)  | บวก        | ลบ      | ( มม.)      | ( มม.)  | บวก        | ลบ      | ( มม.)      | ( มม.)  | บวก        | ลบ      |
| คาน        | B1    | 300         | 550     | 3-DB19     | 5-DB22  | 300         | 500     | 3-D19      | 6-D22   | 300         | 500     | 3-D19      | 6-D22   |
|            | B2    | 300         | 500     | 3-DB19     | 5-DB22  | 300         | 500     | 3-D19      | 6-D22   | 300         | 500     | 3-D19      | 6-D22   |
|            | B3    | 250         | 550     | 3-DB19     | 4-DB22  | 300         | 500     | 3-D19      | 5-D22   | 300         | 500     | 3-D19      | 5-D22   |
| เสา        | C1    | 350         | 350     | 4-D25      |         | 400         | 400     | 8-D25      |         | 400         | 400     | 8-D25      |         |
|            | C2    | 450         | 450     | 6-D25      |         | 500         | 500     | 8-D25      |         | 450         | 450     | 12-D25     |         |
|            | C3    | 300         | 300     | 4-D25      |         | 350         | 350     | 8-D25      |         | 350         | 350     | 8-D25      |         |
|            | C4    | 350         | 350     | 4-D25      |         | 350         | 350     | 8-D25      |         | 350         | 350     | 8-D25      |         |
| จำนวนรอบ   |       | 64          |         |            |         | 106         |         |            |         | 158         |         |            |         |
| ราคา (\$)  |       | 45,841      |         |            |         | 48,514      |         |            |         | 48,263      |         |            |         |
| % ความต่าง |       | 0           |         |            |         | 5.51        |         |            |         | 5.02        |         |            |         |

### 5.3 ตัวอย่างที่ 3 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง 12 ชั้น

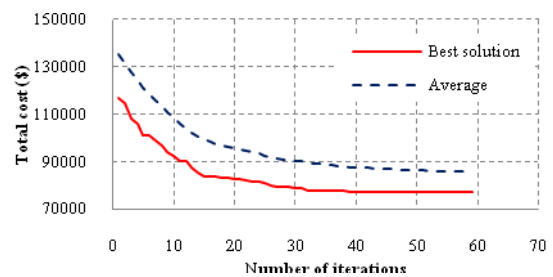
ตัวอย่างที่ 3 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง จำนวน 12 ชั้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมด 84 ชิ้นส่วน ถูกจำแนกกลุ่มเพื่อออกแบบโครงสร้างออกเป็น 8 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของเสา คือ C1 C2 C3 C4 C5 และ C6 กลุ่มของคาน คือ B1 B2 และ B3 ดังที่แสดงในรูปที่ 7 สำหรับจำนวนอนุภาคสูงสุดของตัวอย่างนี้ได้กำหนดเท่ากับ 300 ตัว [12]



รูปที่ 7 โครงข้อแข็ง 3 ช่วง 12 ชั้น สำหรับตัวอย่างที่ 3

ผลการทดสอบของตัวอย่างที่ 3 มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบดังรูปที่ 8 ซึ่งพบว่า PSO สามารถค้นพบคำตอบที่ดีขึ้นอย่างช้าๆ ในทุกรอบการทำงานจนถึงรอบที่ 39 จากนั้นไม่สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมกว่าจนหยุดการทำงานในรอบที่ 59 โดยที่ผลของราคาเฉลี่ยของกลุ่มประชากรในรอบสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 85,581 \$ และคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มประชากรมีราคาเท่ากับ 77,167 \$

สำหรับผลการออกแบบของตัวอย่างที่ 3 แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PSO สามารถออกแบบได้ประหยัดกว่า HPSACO และ HBB-BC ร้อยละ 7.31 และ 4.89 ตามลำดับ โดยที่ใช้จำนวนรอบน้อยกว่า 49 และ 123 รอบ ยิ่งไปกว่านั้น ในตัวอย่างนี้ยังเป็นการยืนยันว่า PSO สามารถออกแบบได้ประหยัดกว่า HPSACO และ HBB-BC เมื่อจำนวนตัวแปรออกแบบเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 8 การลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการออกแบบของ PSO กับงานวิจัยของ Kaveh [12] สำหรับตัวอย่างที่ 3

| วิธีการ    |       | PSO                |                  |                |               | HPSACO [12]        |                  |                |               | HBB-BC [12]        |                  |                |               |
|------------|-------|--------------------|------------------|----------------|---------------|--------------------|------------------|----------------|---------------|--------------------|------------------|----------------|---------------|
| ชนิด       | กลุ่ม | ขนาดหน้าตัด        |                  | เหล็กเสริม     |               | ขนาดหน้าตัด        |                  | เหล็กเสริม     |               | ขนาดหน้าตัด        |                  | เหล็กเสริม     |               |
|            |       | ความกว้าง<br>(มม.) | ความลึก<br>(มม.) | โมเมนต์<br>บวก | โมเมนต์<br>ลบ | ความกว้าง<br>(มม.) | ความลึก<br>(มม.) | โมเมนต์<br>บวก | โมเมนต์<br>ลบ | ความกว้าง<br>(มม.) | ความลึก<br>(มม.) | โมเมนต์<br>บวก | โมเมนต์<br>ลบ |
| คาน        | B1    | 400                | 550              | 3-DB19         | 6-DB22        | 350                | 550              | 3-D19          | 7-D22         | 350                | 600              | 3-D19          | 6-D22         |
|            | B2    | 350                | 550              | 3-DB19         | 6-DB22        | 350                | 550              | 3-D19          | 6-D22         | 300                | 550              | 5-D19          | 6-D22         |
|            | B3    | 300                | 550              | 3-DB19         | 5-DB22        | 350                | 550              | 3-D19          | 5-D22         | 300                | 500              | 3-D19          | 6-D22         |
| เสา        | C1    | 400                | 400              | 6-D25          |               | 500                | 500              | 8-D25          |               | 450                | 450              | 10-D25         |               |
|            | C2    | 550                | 550              | 8-D25          |               | 650                | 650              | 10-D25         |               | 600                | 600              | 12-D25         |               |
|            | C3    | 350                | 350              | 6-D25          |               | 450                | 450              | 8-D25          |               | 400                | 400              | 10-D25         |               |
|            | C4    | 450                | 450              | 6-D25          |               | 500                | 500              | 10-D25         |               | 500                | 500              | 10-D25         |               |
|            | C5    | 350                | 350              | 6-D25          |               | 350                | 350              | 6-D25          |               | 350                | 350              | 8-D25          |               |
|            | C6    | 350                | 350              | 4-D25          |               | 400                | 400              | 4-D25          |               | 400                | 400              | 4-D25          |               |
| จำนวนรอบ   |       | 59                 |                  |                |               | 108                |                  |                |               | 182                |                  |                |               |
| ราคา (\$)  |       | 77,167             |                  |                |               | 83,250             |                  |                |               | 81,138             |                  |                |               |
| % ความต่าง |       | 0                  |                  |                |               | 7.31               |                  |                |               | 4.89               |                  |                |               |

## 6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบประยุกต์ใช้ PSO สำหรับออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมพบว่า PSO สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี โดยสามารถออกแบบได้อย่างประหยัดมากกว่า HPSACO ร้อยละ 0.28 5.51 และ 7.31 ตามลำดับ และประหยัดกว่า HBB-BC ร้อยละ 0.28 5.02 และ 4.89 ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการออกแบบที่ได้รับจาก PSO ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า PSO สามารถออกแบบได้ประหยัดกว่างานวิจัยที่ถูกรับเทียบเมื่อตัวแปรออกแบบหรือชิ้นส่วนโครงสร้างมีจำนวนเพิ่มขึ้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Tapown, A. Lamom and R. Cheerarat, "Optimum design of reinforced concrete rectangular column using hill climbing algorithm," Research and development journal of the engineering institute of thailand, Vol.23, No.2, pp.28-35, June, 2555.
- [2] M. Y. Rafiq and C. Southcombe, "Genetic algorithms in optimal design and detailing of reinforced concrete biaxial columns supported by a declarative approach for capacity checking," Computers and structures, vol. 69, pp. 443-457, 1998.
- [3] V. C. Charles, P. Shahram, H. Hakan, "Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm," Journal of structural engineering, vol. 129, pp. 105-115, 2003.
- [4] H. G. Kwak and J. Kim, "An integrated genetic algorithm complemented with direct search for optimum design of RC frames," Computer-aided design, vol. 41, pp. 490-500, 2009.
- [5] T. Augusto, K. Mounir, M. C. Antonio, "A cost optimization-based design of precast concrete floors using genetic algorithms," Automation in Construction, vol. 22, pp. 348-356, 2012.
- [6] S. Das, A. Abraham, A. Konar, "Particle swarm optimization and differential evolution algorithms: technical analysis, applications and hybridization perspectives," Studies in computational intelligence, vol. 116, pp. 1-38, 2008.
- [7] L. J. Li, Z. B. Huang, F. Liu, "A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables," Computers and structures, vol. 87, pp. 435-443, 2009.
- [8] A. Ghoddosian and M. Sheikhi, "Using particle swarm optimization for minimization of moment peak in structure," Australian journal of basic and applied sciences, vol. 5, pp. 1428-1434, 2011.
- [9] B. A. Nedushan and H. Varace, "Minimum cost design of concrete slabs using particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients," World applied sciences journal, vol. 13, pp. 2484-2494, 2011.
- [10] E. Dogan and M. P. Saka, "Optimum design of unbraced steel frames to LRFD-AISC using particle swarm optimization," Advances in engineering software, vol. 46, pp. 27-34, 2012.
- [11] American Concrete Institute (ACI), "Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-08)," America, 2008.
- [12] A. Kaveh and O. Sabzi, "A comparative study of two meta-heuristic algorithms for optimum design of reinforced concrete frames," International journal of civil engineering, vol. 9, pp. 193-206, 2011.
- [13] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proceedings of IEEE international conference on neural networks, 1995, IV, pp. 1942-1948.
- [14] E. Dogan and M. P. Saka, "Optimum design of unbraced steel frames to LRFD-AISC using particle swarm optimization," Advances in engineering software, vol. 46, pp. 27-34, 2012.