

ประสิทธิภาพของฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับออกแบบที่เหมาะสม ของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

The Performance of Heuristic Algorithms for Optimum Design of Reinforced Concrete Foundations

อัศนัย ทาภา อลงกรณ์ ละม่อม เรืองรุชด์ ชีระโรจน์
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งประกอบด้วยฮิลไคลมิงอัลกอริทึมและซิมมูลเตดแอลเนลลิ่งอัลกอริทึม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ การเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของฮิวริสติกอัลกอริทึมดังกล่าวโดยกำหนดให้ราคาค่าก่อสร้างเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โปรแกรม Microsoft visual basic 6 ถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนากระบวนการออกแบบที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบของ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ศ.ท. 1008-38) วิธีกำลัง ตัวอย่างฐานรากที่แตกต่างกันจำนวน 4 ตัวอย่างถูกเลือกมาจาก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและประสิทธิภาพของฮิวริสติกอัลกอริทึมทั้งสองวิธีจะถูกประเมินโดยใช้ผลการทดสอบทางสถิติ ผลการ ทดสอบแสดงให้เห็นว่า ผลการทดสอบทางสถิติของซิมมูลเตดแอลเนลลิ่งอัลกอริทึมดีกว่าฮิลไคลมิงอัลกอริทึม นอกจากนี้ ฮิวริสติกอัลกอริทึมทั้งสองวิธีได้รับคำตอบที่เหมาะสมกว่าวิธีดั้งเดิมในทุกตัวอย่างทดสอบเฉลี่ยร้อยละ 9.24

คำสำคัญ: การออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม ซิมมูลเตดแอลเนลลิ่งอัลกอริทึม

Abstract

This research introduces applying the heuristic algorithms for optimum design of reinforced concrete foundations which consist of a hill climbing algorithm and simulated annealing algorithm. The objective of this research is to compare the effectiveness of these heuristic algorithms by defining the construction cost as the objective function. Microsoft visual basic 6 was used to develop the optimization process in accordance with the strength design method of the Engineering Institute of Thailand (E.I.T. 1008-38). Four different reinforced concrete foundations were selected from the related literatures and the performance of two heuristic algorithms was evaluated by the statistical results. The results showed that the statistical results of the simulated annealing algorithm were better than the hill climbing algorithm. In addition, the optimum solutions obtained from two heuristic algorithms were an average of 9.24 % better than the traditional method for all examples.

Keywords: Reinforced concrete foundations, Hill climbing algorithm, Simulated annealing algorithm

1. บทนำ

ฮิวริสติกอัลกอริทึม (Heuristic algorithm) เป็นขั้นตอนวิธีแก้ปัญหาที่จำลองมาจากการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงสามัญสำนึกทั่วไปของมนุษย์เพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการทางคณิตศาสตร์แบบดั้งเดิม โดยที่มีความถูกต้องเที่ยงตรงและรวดเร็วต่อการแก้ปัญหาที่เหมาะสม [1] วิธีการแก้ปัญหตามแนวคิดนี้มีด้วยกันหลายวิธีได้แก่ ฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม (Hill climbing algorithm: HCA) ซิมมูลเตดแอแนลลิงอัลกอริทึม (Simulated annealing: SA) ตาบูเซิร์ช (Tabu search: TS) และเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm: GA) เป็นต้น

ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา ได้มีหลายงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเช่น Zaforteza และคณะ [2] ใช้ SA ออกแบบโครงข้อแข็งที่มีอัตราการใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบที่เกิดกับสิ่งแวดล้อม Yepes และคณะ [3] สามารถพัฒนา SA ให้สามารถเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ก่อสร้างกำแพงกันดินได้ Cello และ Hernández [4] นำเสนอการใช้งาน GA สำหรับออกแบบคานช่วงเดียวที่เหมาะสม Govindaraj และ Ramasamy [5] ได้พัฒนา GA ให้สามารถใช้ออกแบบคานต่อเนื่อง 3 ช่วง Alex และ Kottalil [6] พัฒนา GA ให้สามารถออกแบบคานต่อเนื่อง 4 ช่วงที่มีหน้าตัดถึง 12 หน้าตัดได้สำเร็จ Hassajan และคณะ [7] ได้ศึกษาผลกระทบของราคาวัสดุก่อสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับคานช่วงเดียวโดยใช้ HCA Laoprom และคณะ [8] แสดงให้เห็นว่า การออกแบบคานที่เหมาะสมโดย SA มีความประหยัดมากกว่าการออกแบบที่ได้รับจากวิธีการดั้งเดิม Tapown และคณะ [9] ได้แสดงถึงประสิทธิภาพของ HCA ที่สามารถออกแบบเสารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียวและสองทางที่ประหยัดกว่า GA และงานวิจัยของ Tapown และคณะ [10] ได้นำเสนอการเลือกใช้ค่าอุณหภูมิและอัตราการลดอุณหภูมิที่เหมาะสมของ SA

สำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กรูปแบบอื่นด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า การใช้ HCA และ SA เป็นที่นิยมมากสำหรับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม เนื่องจาก เป็นวิธีที่มีความง่ายต่อการนำไปใช้งานและมีขั้นตอนการทำงานที่ซับซ้อนน้อยกว่าฮิวริสติกอัลกอริทึมอื่น โดยจากผลการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นแล้วว่า ทั้ง 2 วิธีล้วนมีประสิทธิภาพต่อการแก้ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในเรื่องประสิทธิภาพของ HCA และ SA งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ HCA และ SA สำหรับออกแบบฐานรากคานและฐานรากคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกาลัง [11] โดยใช้ผลการทดสอบทางสถิติเป็นค่าชี้วัดศักยภาพของทั้งสองวิธี

2. ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 ข้อกำหนดการออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

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

1) กำลังรับแรงตามแนวแกนของฐานราก (ϕP_u) ต้องมีค่ามากกว่าแรงตามแนวแกนที่กระทำ (P_u) โดยที่กำลังรับแรงตามแนวแกนของฐานรากคานจะขึ้นอยู่กับขนาดฐานรากและกำลังรับน้ำหนักของดิน แต่ในฐานรากคานจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเสาเข็ม

2) กำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของฐานราก (ϕM_u) จะต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่กระทำ (M_u)

3) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กชั้นดัดกำหนดใช้เท่ากับ 7.5 ซม.

4) ค่าความลึกของฐานรากเหนือเหล็กเสริมอย่างน้อยที่สุด 15 ซม. สำหรับฐานรากคาน และอย่างน้อย 30 ซม. สำหรับฐานรากคาน

5) ปริมาณเหล็กเสริมในฐานราก (A_s) จะต้องมีค่ามากกว่าสมการที่ (1) แต่ต้องไม่เกินสมการที่ (2)

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

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

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 β_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) กำลังรับแรงเฉือนทะลุ (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_d) จะต้องมีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนแบบคานที่ยอมให้ ($\phi v_{d,allow}$) ตามสมการที่ (5)

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

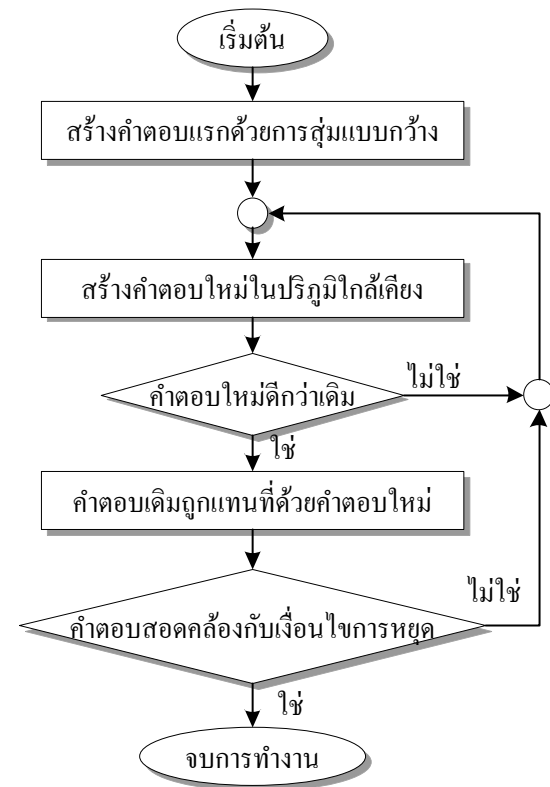
8) ระยะห่างของเสาเข็มสำหรับฐานรากลึกลงจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเสาเข็มที่ถูกเลือกใช้

9) ตัวคูณลดกำลัง ϕ สำหรับโมเมนต์ดัดกำหนดใช้เท่ากับ 0.9 กำลังรับแรงเฉือนทะลุและแรงเฉือนแบบคานเท่ากับ 0.85

2.2 อัลกอริทึม

อัลกอริทึมอัลกอริทึมหรือ HCA เป็นวิธีแก้ปัญหาที่หาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดที่ได้ทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) หรือไม่เชิงเส้น (Non-linear) และได้ทั้งแบบมีเงื่อนไข (Constraint) หรือไม่มีเงื่อนไข (Unconstraint) [12] โดยลักษณะการค้นหาค่าจะพิจารณาคำตอบที่อยู่ในปริภูมิใกล้เคียงเท่านั้นและจะไม่สนใจคำตอบอื่นนอกจากคำตอบที่พิจารณาแล้วว่ามีค่าเหมาะสมกว่าคำตอบ

ปัจจุบันที่เป็นอยู่ [13] ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ HCA เป็นวิธีที่มีความเร็วในการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมวิธีการหนึ่ง โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงาน 5 ขั้นตอนตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลำดับการทำงานของ HCA

2.3 ซิมูเลตเตดแอนเนลลิงอัลกอริทึม

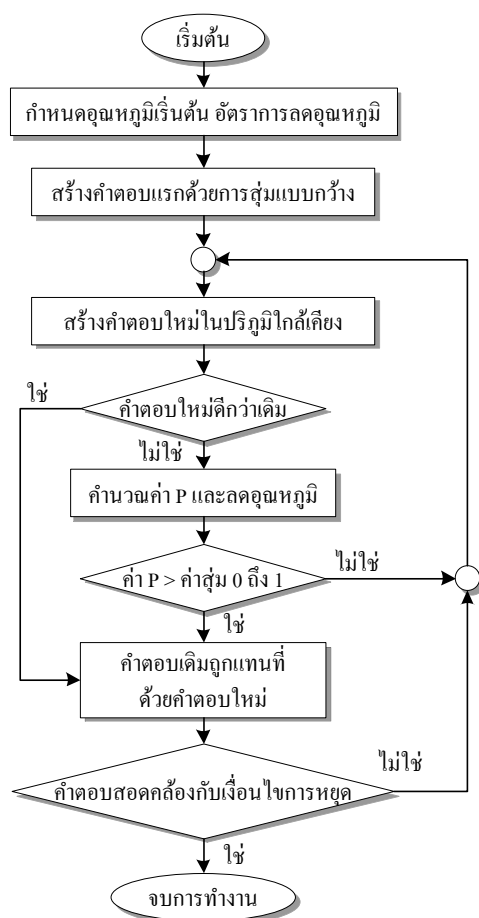
ซิมูเลตเตดแอนเนลลิงอัลกอริทึม หรือ SA มีแนวคิดพื้นฐานมาจากกระบวนการหลอมละลายโลหะแข็งด้วยความร้อนจนโลหะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว หลังจากนั้น ปล่อยให้โลหะเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ด้วยการควบคุมความเร็วในการลดอุณหภูมิที่พอเหมาะจนโลหะกลับมาแข็งตัวอีกครั้ง [14] ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปสู่ของแข็งจะมีความแปรปรวนที่ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของโมเลกุล [15] ดังสมการที่ (6) และความเร็วของการลดอุณหภูมิ (α) ดังสมการที่ (7)

$$P = e^{-\Delta E / T_i} \quad (6)$$

เมื่อ P คือ ความน่าจะเป็นในการยอมรับสถานะใหม่ ΔE คือ ผลต่างของพลังงานที่เปลี่ยนไป T_i คือ อุณหภูมิปัจจุบัน และ T_{i+1} คือ อุณหภูมิในรอบถัดไป

$$T_{i+1} = \alpha T_i \quad (7)$$

สำหรับลำดับการทำงานของ SA จะมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นกว่า HCA ในส่วนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิเริ่มต้น อัตราการลดอุณหภูมิ และกระบวนการยอมรับสถานะใหม่โดยอาศัยค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ P ซึ่งมีลำดับการทำงานดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลำดับการทำงานของ SA

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การพัฒนาโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสม

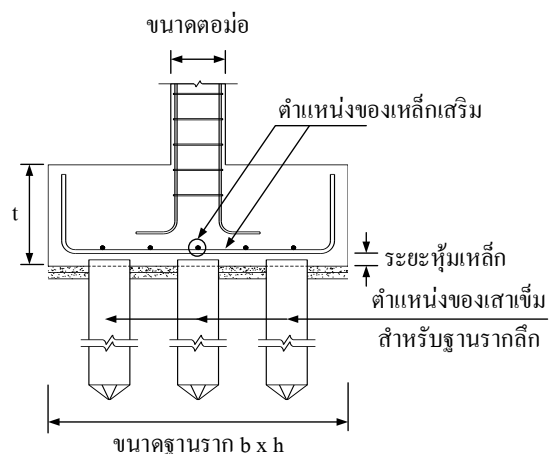
งานวิจัยนี้พัฒนาขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6 ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Window 7 64 bit หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i7-4500U CPU 1.80GHz และหน่วยความจำแรม

DDR3 7.89 GB โดยมีขอบเขตการออกแบบดังตารางที่ 1 เมื่อ f_c ประกอบด้วย 180 210 240 280 300 และ 320 กก./ cm^2 f_y ประกอบด้วย 3,000 และ 4,000 กก./ cm^2 ด้านแคบด้านลึก และความหนาของฐานราก (b h และ t) ปรับเพิ่มครั้งละ 5 ซม. เหล็กเสริมที่ใช้ประกอบด้วยเหล็กขนาด 12 16 20 25 28 32 36 และ 40 มม. จำนวนของเหล็กเสริมปรับเพิ่มครั้งละ 1 เส้น เสาเข็มที่ใช้เป็นเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสตันประกอบด้วยขนาด 0.22 0.26 0.30 และ 0.35 ม. รับน้ำหนักปลอดภัยได้ 30 35 45 และ 50 ตัน/ต้น โดยจำนวนเสาเข็มที่สามารถเลือกออกแบบได้คือ 2 ถึง 9 ต้น

ตารางที่ 1 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนา

ตัวแปรออกแบบ	สำหรับ	ต่ำสุด	ค่าสูงสุด	หน่วย
f_c	ทุกฐานราก	180	320	กก./ cm^2
f_y	ทุกฐานราก	3,000	4,000	กก./ cm^2
ด้านแคบ (b)	ฐานรากคั่น	100	300	ซม.
ด้านกว้าง (h)	ฐานรากคั่น	100	300	ซม.
ความหนา (t)	ทุกฐานราก	20	200	ซม.
เหล็กเสริม	ทุกฐานราก	12	40	มม.
จำนวนเหล็กเสริม	ทุกฐานราก	5	20	เส้น
ขนาดเสาเข็ม	ฐานรากลึก	0.22	0.35	ม.
จำนวนเสาเข็ม	ฐานรากลึก	4	9	ต้น

รูปแบบการเสริมเหล็กและตำแหน่งของเสาเข็มในฐานรากแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งขนาดของฐานรากจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีด้าน b และ h เท่ากัน และขนาดของเสาเข็มกำหนดเป็นเสารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น โดยที่ลักษณะการเสริมเหล็กจะเสริมเป็นตะแกรงรูปตัว U ตามขนาดและจำนวนของเหล็กเสริมที่กำหนดไว้



รูปที่ 3 ตำแหน่งการเสริมเหล็กและเสาเข็มในฐานราก

3.2 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ฟังก์ชันของราคาที่ได้รับผลกำไรสูงสุดของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความประหยัดมากที่สุด โดยที่สมการที่ (8) ถูกกำหนดใช้สำหรับฐานรากคานและสมการที่ (9) ถูกกำหนดใช้สำหรับฐานรากคาน

$$F = \text{Min} \sum (M_C C_C + M_S C_S + M_F C_F) \quad (8)$$

$$F = \text{Min} \sum (M_C C_C + M_S C_S + M_F C_F + M_P C_P) \quad (9)$$

เมื่อ M_C M_S M_F และ M_P คือ ปริมาณของ คอนกรีต เหล็กเสริม แบบหล่อและจำนวนเสาเข็มตามลำดับ C_C C_S C_F และ C_P คือ ราคาของคอนกรีต เหล็กเสริม แบบหล่อ และเสาเข็มตามลำดับ

3.3 ราคาวัสดุและค่าแรง

ราคาวัสดุและค่าแรงสำหรับใช้คำนวณราคาฐานราก คอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในตารางที่ 2 ประกอบด้วยราคา คอนกรีตผสมเสร็จ ราคาแบบหล่อ เหล็กเสริม และเสาเข็ม ที่นำมาจากบัญชีค่าแรง/ค่าเนิการ สำหรับถอดแบบ คำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2558 [16] ซึ่งราคานี้สามารถปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับท้องถิ่นๆได้

ตารางที่ 2 ราคาวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้

รายการ	หน่วย	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	รวม
คอนกรีตผสมเสร็จและแบบหล่อ				
กำลังอัด 180 กก./ชม. ²	บาท/ม. ³	2,430	485	2,915
กำลังอัด 210 กก./ชม. ²	บาท/ม. ³	2,470	485	2,955
กำลังอัด 240 กก./ชม. ²	บาท/ม. ³	2,510	485	2,995
กำลังอัด 280 กก./ชม. ²	บาท/ม. ³	2,550	485	3,035
กำลังอัด 300 กก./ชม. ²	บาท/ม. ³	2,600	485	3,085
กำลังอัด 320 กก./ชม. ²	บาท/ม. ³	2,630	485	3,115
แบบหล่อคอนกรีต	บาท/ม. ²	533	133	666
เหล็กเสริมคอนกรีต				
ระดับชั้น SD30	บาท/กก.	20.44	3.4	23.84
ระดับชั้น SD40	บาท/กก.	20.77	3.4	24.17
เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมตัน				
0.22x0.22 ยาว 21 ม.	บาท/ต้น	6,800	1,430	8,230
0.26x0.26 ยาว 21 ม.	บาท/ต้น	9,500	1,450	10,950
0.30x0.30 ยาว 21 ม.	บาท/ต้น	12,220	1,520	13,740
0.35x0.35 ยาว 21 ม.	บาท/ต้น	16,360	1,712	18,072

3.4 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่เลือกใช้งานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 ตัวอย่างโดยแบ่งออกเป็นฐานรากแผ่และฐานรากคานอย่างละ 2 ตัวอย่างตามตารางที่ 3 โดยแต่ละตัวอย่างถูกนำมาจากการออกแบบที่ได้จากวิธีดั้งเดิม [17,18] ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่	1	2	3	4
ชนิดฐานราก	ฐานแผ่	ฐานแผ่	ฐานคาน	ฐานคาน
ดอม (ชม.)	20 x 20	35 x 35	40 x 40	50 x 50
ระยะขุม (ชม.)	7.5	7.5	7.5	7.5
P (กก.)	9,600	36,000	75,000	240,000
Pu (กก.)	14,600	60,432	112,500	376,440
qu (กก./ม. ²)	8,000	10,000	-	-

การสร้างคำตอบแรกของแต่ละตัวอย่างสำหรับ HCA และ SA เกิดจากการสุ่มตัวแปรออกแบบตามขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งจะสุ่มจนกระทั่งคำตอบแรกผ่านมาตรฐานการออกแบบ จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการออกแบบที่เหมาะสมต่อไป

ในแต่ละตัวอย่างจะถูกออกแบบจำนวน 25 ครั้ง โดยกระบวนการการออกแบบที่เหมาะสมแต่ละครั้งจะหยุดค้นหาคำตอบเมื่อค้นพบคำตอบที่เหมาะสมติดต่อกัน 3 ครั้ง [9,10] สำหรับค่าพารามิเตอร์ SA เลือกใช้อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 100 ของราคาคำตอบแรกและกำหนดใช้ค่า α ร้อยละ 2 เนื่องจากงานวิจัยของ Tapown และคณะ [10] พบว่า ค่าพารามิเตอร์นี้ได้รับคำตอบจากการวิเคราะห์ทางสถิติแบบที (t-test) ที่มีราคาต่ำสุดเท่ากับราคาเฉลี่ยในกลุ่มประชากรแต่ละตัวอย่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 เมื่อกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 25 ถึง 400 ของราคาคำตอบแรก และค่า α อยู่ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 30

4. ผลการทดสอบ

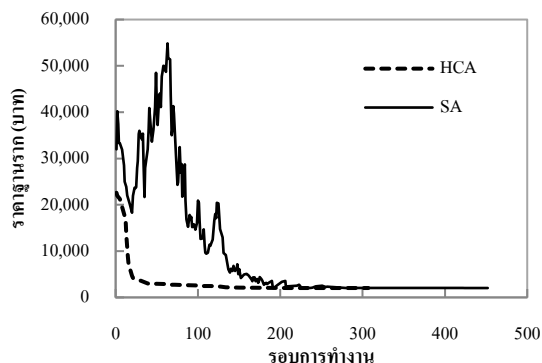
จากผลการทดสอบออกแบบตัวอย่างละ 25 ครั้งและผลการทดสอบทางสถิติแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า HCA และ SA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากันในทุกตัวอย่าง ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของ SA มีค่าต่ำ

กว่า HCA ในทุกตัวอย่างทดสอบ และยังไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะเห็นได้ว่า SA ได้รับค่าที่ต่ำกว่า HCA เป็นอย่างมากโดยคิดเป็นร้อยละ 90.58 44.03 90.06 และ 72.06 ตามลำดับ

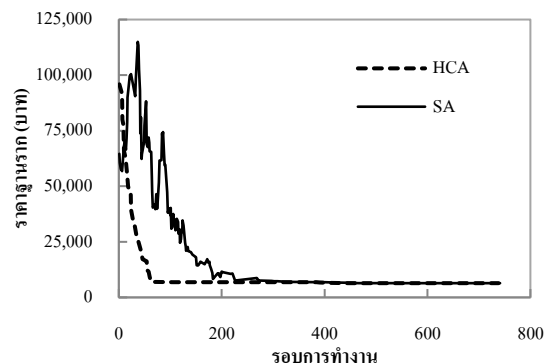
สำหรับลักษณะการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของ HCA และ SA ในแต่ละตัวอย่างทดสอบแสดงให้เห็นในรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ถึงความแตกต่างการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของทั้ง 2 วิธี การเข้าสู่ของ HCA เป็นไปในลักษณะพุ่งตรงไปหาเป้าหมายซึ่งเน้นไปที่สถานะค่าตอบใหม่ที่ดีกว่าเพียงอย่างเดียวโดยไม่สนใจสถานะที่ต่ำกว่า ในขณะที่การเข้าสู่ของ SA มีความแตกต่าง และดูเหมือนจะช้ากว่า HCA เนื่องจาก SA ถูกออกแบบมาให้ค้นหาค่าตอบให้ทั่วถึงก่อนในช่วงแรกขณะที่อุณหภูมิยังเหลืออยู่และเริ่มตัวอย่างรวดเร็วในช่วงปลายเมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนมีค่าใกล้ 0 ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ SA มีประสิทธิภาพและได้รับผลการทดสอบทางสถิติที่ดีกว่า HCA ทั้งค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในทุกตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบทางสถิติของทั้ง 2 วิธี

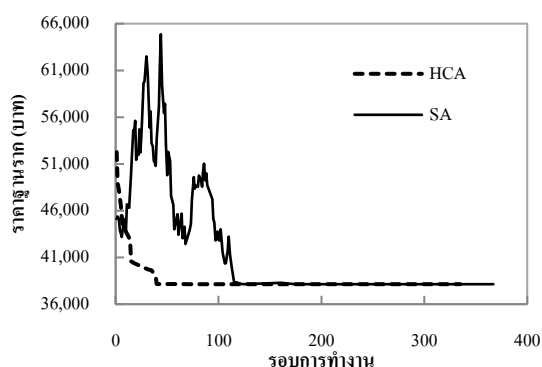
ตัวอย่างที่	1		2		3		4	
วิธีการ	HCA	SA	HCA	SA	HCA	SA	HCA	SA
ราคาต่ำสุด	2,028.47	2,028.47	6,408.71	6,408.71	38,136.71	38,136.71	111,925.30	111,925.30
ราคาสูงสุด	2,931.53	2,118.77	7,632.93	6,876.18	50,751.34	39,029.12	114,490.40	112,476.90
ราคาเฉลี่ย	2,083.90	2,036.58	6,584.24	6,538.76	38,895.69	38,265.72	112,220.04	112,085.94
ค่ามัธยฐาน	2,028.47	2,028.47	6,408.71	6,408.71	38,160.23	38,136.71	112,169.70	112,066.10
ค่าฐานนิยม	2,028.47	2,028.47	6,408.71	6,408.71	38,136.71	38,136.71	112,169.70	112,066.10
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	199.39	18.78	287.03	160.65	2,507.90	249.33	494.02	138.04



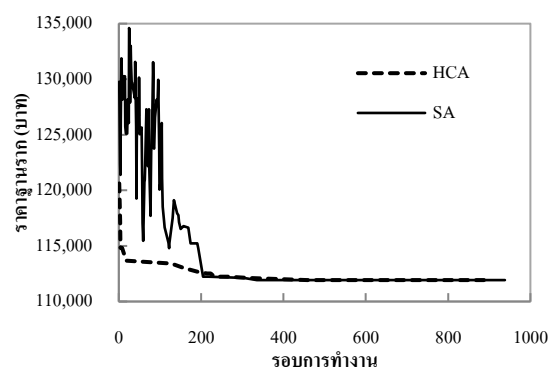
ก) ตัวอย่างที่ 1



ข) ตัวอย่างที่ 2



ค) ตัวอย่างที่ 3



ง) ตัวอย่างที่ 4

รูปที่ 4 ลักษณะการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4 คำตอบแรกจะมีผลต่อความเร็วในการคู่ของ HCA มากกว่า SA สำหรับ HCA หากคำตอบแรกอยู่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสม HCA จะทำงานได้เร็วขึ้น แต่คำตอบที่ได้รับอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดเนื่องจาก HCA เป็นวิธีหาคำตอบเฉพาะแห่ง สำหรับคำตอบแรกของ SA จะส่งผลต่อการคู่เข้าของคำตอบเพียงเล็กน้อยเพราะ SA เป็นวิธีหาคำตอบแบบต่ำสุดที่ไม่ว่าจะคู่คำตอบแรกได้ที่ตำแหน่งไหนก็สามารถคู่เข้าสู่ตำแหน่งที่ดีที่สุดได้ ดังนั้นจึงให้ค่าความแม่นยำทางสถิติที่ดีกว่า HCA

ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ HCA และ SA แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งพบว่า งานวิจัยนี้สามารถออกแบบได้อย่างประหยัดกว่าวิธีดั้งเดิมทุกตัวอย่างทดสอบร้อยละ 18.58 7.95 4.69 และ 5.72 ตามลำดับ โดยผลการออกแบบส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่า การเลือกใช้กำลังวัสดุที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ขนาดฐานรากและปริมาณเหล็กเสริมลดลงซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณและราคาของคอนกรีต เหล็กเสริมและแบบหล่อให้ลดลงตามไปด้วย [9,10]

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมกับวิธีดั้งเดิม

ตัวอย่างที่	1		2		3		4	
ตัวแปรออกแบบ	วิธีดั้งเดิม [17]	*งานวิจัยนี้	วิธีดั้งเดิม [18]	*งานวิจัยนี้	วิธีดั้งเดิม [17]	*งานวิจัยนี้	วิธีดั้งเดิม [18]	*งานวิจัยนี้
F_c (กก./ซม. ²)	200	180	240	180	250	300	240	280
F_y (กก./ซม. ²)	3,000	3,000	3,000	4,000	3,000	4,000	3,000	4,000
b (ซม.)	150	125	200	200	150	132	230	253
h (ซม.)	150	125	200	200	150	132	230	253
t (ซม.)	20	20	30	30	50	45	80	60
ปริมาณเหล็กเสริม	6 - DB12 #	5 - DB16 #	7 - DB20 #	8 - DB16 #	8 - DB20 #	9 - DB16 #	17 - DB25 #	15 - DB20 #
A_s (ซม. ²)	6.78	10.05	21.99	16.08	25.13	18.09	83.45	47.12
ขนาดเสาเข็ม	-	-	-	-	0.22 x 0.22 x 21.0 ม.		0.35 x 0.35 x 21.0 ม.	
จำนวนเสาเข็ม	-	-	-	-	4	4	5	5
ราคาคอนกรีต (บาท)	1323.80	910.94	3,594.00	3,498.00	3,165.08	2,418.89	12,674.84	11,656.04
ราคาเหล็กเสริม (บาท)	368.28	451.53	1,769.67	1,312.30	1,928.41	1,215.41	10,775.66	5,865.31
ราคาแบบหล่อ (บาท)	799.20	666.00	1,598.40	1,598.40	1,998.00	1,582.42	4,901.76	4,043.95
ราคาเสาเข็ม (บาท)	-	-	-	-	32,920.00	32,920.00	90,360.00	90,360.00
ราคารวม (บาท)	2,491.28	2,028.47	6,962.07	6,408.71	40,011.49	38,136.71	118,712.26	111,925.30
ค่าความต่าง (%)	18.58 (462.81 บาท)		7.95 (553.36 บาท)		4.69 (1,874.78 บาท)		5.72 (6,786.96 บาท)	

*หมายเหตุ ผลการออกแบบเลือกใช้น้ำหนักที่ทำให้ราคาค่าต่ำสุด โดยทั้ง HCA และ SA ให้ผลการออกแบบที่เหมือนกัน

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ HCA และ SA โดยใช้ผลการทดสอบทางสถิติสำหรับออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมทั้งฐานรากดินและฐานรากลึกลงพบว่า ผลการทดสอบทางสถิติของ SA ได้รับผลของค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ดีกว่า HCA ทุกตัวอย่างทดสอบเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะการคู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของ SA มีการประเมินคำตอบแบบวงกว้างมากกว่า HCA และเมื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมทั้ง HCA และ SA กับวิธีดั้งเดิมพบว่า ราคาที่ได้รับมีความประหยัดกว่าวิธีดั้งเดิมเฉลี่ยร้อยละ 9.24 ซึ่งเห็นได้ว่า ระบบ

ปัญญาประดิษฐ์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเหมาะสมมากกว่าวิธีดั้งเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] L.M. Schneider, "New Era in transportation strategy," Transportation Strategy, Harvard business review, vol. 63, pp. 118-126, 1985.

- [2] I.P. Zaforteza, V. Yepes, A. Hospitaler and F.G. Vidosa, "CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing," *Engineering structures*, vol. 31, pp. 1501-1508, 2009.
- [3] V. Yepes, J. Alcala, C. Perea and F.G. Vidosa, "A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing," *Engineering structures*, vol. 30, pp. 821-830, 2008.
- [4] C. Coello and F.S. Hernández, "Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms," *Expert systems with applications*, vol. 12, pp. 101-108, 1997.
- [5] V. Govindaraj and J.V. Ramasamy, "Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms," *Computers & structures*, vol. 84, pp 34-48, 2005.
- [6] D.M. Alex and L. Kottalil, "Genetic algorithm based design of a reinforced concrete continuous beam," *International journal of engineering research & technology*, vol. 4, pp. 224-227, 2015.
- [7] S. Hassajan, A. Lamom and R. Cheerarot, "Effect of materials selection on the minimum cost for optimal design of reinforced concrete beams using hill climbing algorithm," *KKU research journal*, vol. 17, pp. 385-400, 2012.
- [8] N. Laoprom, R. Cheerarot and J. Wongpa, "Optimum design of reinforced concrete beams by simulated annealing algorithm," *Research and development journal of the engineering institute of Thailand*, vol. 25, pp. 25-37, 2014.
- [9] A. Tapown, A. Lamom and R. Cheerarot, "Optimum design of reinforced concrete rectangular column using hill climbing algorithm," *Research and development journal of the engineering institute of Thailand*, vol. 23, pp. 28-35, 2012.
- [10] A. Tapown, J. Wongpa, A. Lamom and R. Cheerarot, "Optimum design of reinforced concrete biaxial rectangular column using simulated annealing algorithm," *KMUTT research and development journal*, vol. 36, pp. 33-50, 2013.
- [11] Engineering Institute of Thailand (EIT), "Standard of reinforced concrete building, strength method (E.I.T. 1008-38)," Thailand, 1997.
- [12] A.W. Johnson and S.H. Jacobson, "On the convergence of generalized hill climbing algorithms," *Discrete applied mathematics*, vol. 119, pp. 37-57, 2002.
- [13] D.J. Cross, R. Myers and E.R. Hancock, "Convergence of a hill-climbing genetic algorithm for graph matching," *Pattern recognition*, vol. 33, pp. 1863-1880, 2000.
- [14] C.D. Kirkpatrick, Jr. Gelatl and M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, pp. 671-680, 1983.
- [15] G.P. Potdar and R.C. Thool, "Comparison of various heuristic search techniques for finding shortest path," *International journal of artificial intelligence & applications*, vol. 5, pp. 63-74, 2014.
- [16] Committee of construction price, "Labor account/operation for estimate and calculate price (revised edition) year 2015," Bangkok in Thailand, 2015.
- [17] V. Chovichien, "Reinforced Concrete Design (Strength Design Method : SMD)," Bangkok in Thailand, 2002.
- [18] S. Rukzon, "Reinforced Concrete Structure Design : Strength and Working Design Method," Bangkok in Thailand, 2012.