การออกแบบหน้าตัดที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงดัดสองทางด้วยวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

Optimum Design of Reinforced Concrete Biaxial Bending Rectangular Column using Artificial Bee Colony Algorithm

อัศนัย ทาเภา เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทาง ซึ่งวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6 และตรวจสอบผลการออกแบบหน้าตัดเสาโดยใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ให้มีจำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมสำหรับออกแบบหน้าตัดเสาที่ประหยัด ตัวอย่างทดสอบเลือกใช้ 2 ตัวอย่างที่มีน้ำหนักกระทำและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางได้และมีเร็วมากกว่าอัลกอริทึมจำลองการหล่อออบเหนียว

คำสำคัญ : การออกแบบที่เหมาะสม เสารับแรงดัดสองทาง วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

Abstract

This research presents the application of artificial bee colony algorithm for optimum cross-section design of reinforced concrete biaxial rectangular column. An artificial bee colony algorithm was developed by Microsoft visual basic 6 to design the reinforced concrete column and verified cross-section design by EIT 1008-38 strength design method standard. The parameters of artificial bee colony algorithm were adjusted to obtain the optimal iteration for saving cost of column design. Two examples were selected that various define different applied load and concrete covering. The result showed that the artificial bee colony algorithm can be apply for optimum design of biaxial reinforced concrete rectangular column and faster than that of the simulated annealing algorithm.

Keywords : Optimum design, Biaxial bending column, Artificial bee colony algorithm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์(Artificial bee colony algorithm : ABC) เป็นระบบปัญญาประดิษฐ์ใหม่ชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Karaboga [1] ในปี ค.ศ. 2005 ทดลองใช้วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ในการแก้ปัญหาคำตอบที่เหมาะสมของ LNCS (Lecture notes in computer science) ซึ่งพบว่า วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สามารถแก้ไขปัญหา LNCS ได้เป็นอย่างดี จากนั้น Karaboga ทดสอบวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์อีกครั้งเพื่อแก้ปัญหาเชิงตัวเลขที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายตัวแปร (Multi objective functions problem) [2] และเปรียบเทียบผลกับอัลกอริทึมแบบกลุ่มที่ประกอบด้วย อัลกอริทึมวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential evolution : DE) [3] อัลกอริทึมฝูงอนุภาค อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมและอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm : EA) [4] จากผลการทดสอบพบว่าวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สามารถแก้ไขปัญหาเชิงตัวเลขได้ดีกว่าทุกอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ที่เหมาะสม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สำหรับออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมโดยใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง [5] เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์โดยเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยอัลกอริทึมจำลองการหล่อหลอมเหนียว (Simulated annealing algorithm : SA)

2. วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์หรือ ABC คือขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดตามเงื่อนไขที่กำหนดด้วยวิธีการสุ่มคำตอบที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้คำตอบที่ต้องการ วิธีนี้ได้เลียนแบบพฤติกรรมการออกหาอาหารของฝูงผึ้ง ที่แบ่งการทำงานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ฝูงผึ้งงาน (Employed bees) ฝูงผึ้งสำรวจ (Onlooker bees) และผึ้งสอดแนม (Scout bees) โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. เริ่มต้นด้วยการสร้างผึ้งงานตามจำนวนที่กำหนดโดยใช้สมการที่ (1) หลังจากนั้นเปลี่ยนผึ้งงานทุกตัวให้กลายเป็นผึ้งสำรวจ

$$x_{ij} = x_{\min j} + \text{rand}[0,1](x_{\max j} - x_{\min j}) \quad (1)$$

เมื่อ j = 1,2,…,D และ i = 1,2,…,Ns x_{max} และ x_{min} คือขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ j หลังจากที่สร้างผึ้งเริ่มต้นแล้ว ผึ้งทุกตัวจะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันความเหมาะสม

2. สร้างแหล่งอาหารโดยใช้สมการที่ (2) ตามจำนวนที่กำหนดและส่งผึ้งสำรวจมาเก็บอาหาร

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (2)$$

เมื่อ k = 1,2,…,Ns และ j = 1,2,…,D คือค่าสุ่มในชุดข้อมูล x_{kj} คือตัวแปรที่สุ่มมาจากผึ้งงานตัวที่ i และค่า ϕ_{ij} คือค่าสุ่มที่มีค่าระหว่าง [-1,1]

3. ผึ้งสำรวจจะเลือกแหล่งอาหารที่พบโดยพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็น P_i คำนวณจากสมการที่ (3) เปรียบเทียบกับค่าสุ่ม P_i ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่าที่สุ่มมีค่าน้อยกว่า ผึ้งสำรวจจะนำอาหารกลับสู่รังและเปลี่ยนตัวเองเป็นผึ้งงานและทำต่อขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า P_i น้อยกว่าค่าสุ่ม ให้กำหนดผึ้งสำรวจเป็นผึ้งสอดแนมและทำต่อขั้นตอนที่ 2

$$P_i = \frac{\text{Cost}_i(x_i)}{\sum_{i=1}^{S_N} \text{Cost}_i(x_i)} \quad (3)$$

4. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดหรือจำนวนรอบการทำงาน ถ้าครบจำนวนรอบหรือเงื่อนไขการหยุดทำงาน ให้หยุดการทำงานทันที แต่ถ้าไม่เข้าเงื่อนไขใดเลยให้ทำต่อขั้นตอนที่ 2

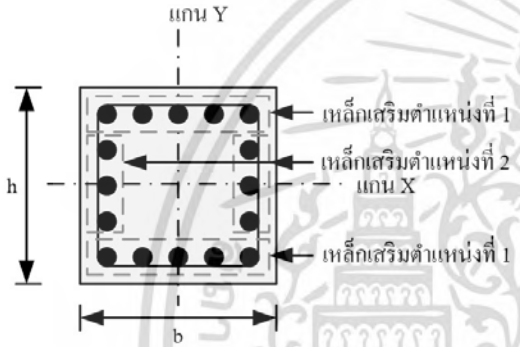
3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม

การวิจัยครั้งนี้ใช้คอมพิวเตอร์ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดว์ 7 หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i3 M330 2.13GHz หน่วยความจำแรม DDR3 1.92GB และเลือกใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6.0 พัฒนาขั้นตอนวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สำหรับออกแบบหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมโดยตารางที่ 1 แสดงขอบเขตการทำงานของโปรแกรมซึ่งประกอบด้วย กำลังอัดคอนกรีต 210, 240, 280, 300 และ 320 กก./ซม.^{2} หน้าตัดเสามีขนาด 20 x 20 ซม. ปรับเพิ่มค่าทีละ 5 ซม. จนถึงเสาขนาด 150 x 150 ซม. เหล็กปลอกกำหนดใช้ระดับชั้น SR24 (ขนาด 6 และ 9 มม.) และ SD30 (ขนาด 10 และ 12 มม.) สำหรับเหล็กยืนมีระดับชั้น SD30 และ SD40 ขนาด 12, 16, 20, 22, 25, 28, 32, 36 และ 40 มม. การเสริมเหล็กยืนจะเสริมโดยรอบหน้าตัดเสา 2 ตำแหน่งที่ต่างกันดังรูปที่ 1 ตำแหน่งแรกคือตำแหน่งบนและล่าง และตำแหน่งที่สองคือด้านซ้ายและด้านขวาของหน้าตัดโดยมีเหล็กรัดรอบเหล็กยืน 1 เส้น



รูปที่ 1 ตำแหน่งเหล็กเสริมในหน้าตัดเสา

ตารางที่ 1 ขอบเขตการใช้งานของโปรแกรม

ตัวแปรออกแบบ	ต่ำสุด	สูงสุด	หน่วย
กำลังอัดคอนกรีต	210	320	กก./ซม.^{2}
กำลังของเหล็กเสริม	3,000	4,000	กก./ซม.^{2}
ด้านแคบของเสา (b)	20	150	ซม.
ด้านลึกของเสา (h)	20	150	ซม.
ขนาดของเหล็กยืน	12	40	มม.
เหล็กปลอก SR24	6	9	มม.
เหล็กปลอก SD30, SD40	10	12	มม.
จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 1	2	40	เส้น/ด้าน
จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 2	0	40	เส้น/ด้าน

สำหรับการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมจำเป็นต้องกำหนดราคาวัสดุและค่าแรงเพื่อคำนวณหาราคาของโครงสร้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ราคาคอนกรีตผสมเสร็จ ราคาแบบหล่อและเหล็กเสริมจากบัญชีค่าแรง/ดำเนินการสำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2557 [6] (ตารางที่ 2) อย่างไรก็ตาม ราคาที่นำมาใช้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามราคาในท้องที่นั้นๆ

ตารางที่ 2 ราคากลางวัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอก)			
กำลังอัด (f'c)	ราคาวัสดุ	ค่าแรงงาน	หน่วย
210	2,510	485	บาท/ม.^{3}
240	2,550	485	บาท/ม.^{3}
280	2,630	485	บาท/ม.^{3}
300	2,670	485	บาท/ม.^{3}
320	2,710	485	บาท/ม.^{3}
ราคาเหล็กเสริมและค่าแรง			
เหล็กปลอก SR24	20	3	บาท/กก.
เหล็กยืน SD30	23	2	บาท/กก.
เหล็กยืน SD40	24	2	บาท/กก.
ราคาแบบหล่อและค่าแรง			
แบบหล่อ	400	115	บาท/ม.^{2}

3.2 สมการเป้าหมาย

เป้าหมายของงานวิจัยครั้งนี้คือ การออกแบบหน้าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีราคาประหยัดที่สุด ดังนั้น สมการเป้าหมายคือสมการที่ทำให้ผลการออกแบบและขนาดหน้าตัดมีความประหยัดที่สุดที่คำนวณจากสมการที่ 4 โดยตัวแปรที่มีผลต่อราคาของหน้าตัดเสาประกอบด้วย ปริมาณคอนกรีต ปริมาณแบบหล่อ ปริมาณเหล็กเสริมและค่าแรงงาน

$$F = \text{Min} \sum (V_C C_C + A_F C_F + W_S C_S) \quad (4)$$

เมื่อ F คือ ราคาวัสดุรวมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก V_C คือ ปริมาตรของคอนกรีต C_C คือ ราคารวมวัสดุและค่าแรงสำหรับงานคอนกรีต A_F คือ ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต C_F คือ ราคาแบบหล่อและค่าแรงสำหรับงานหล่อแบบ W_S คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม C_S คือ ราคารวมเหล็กเสริมและค่าแรงงาน

3.3 ขั้นตอนการทำงานโปรแกรมวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

โปรแกรมที่พัฒนาสำหรับออกแบบหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์มีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2 โดยในการใช้งานโปรแกรมวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ต้องกำหนดแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่กระทำทั้งสองแกนก่อน ต่อมากำหนดพารามิเตอร์ให้กับวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ซึ่งประกอบด้วย จำนวนผึ้งงาน จำนวนแหล่งอาหาร และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนรอบสูงสุด หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มทำงานตามกระบวนการดังนี้

1) สร้างผึ้งงานตามจำนวนที่กำหนดด้วยการสุ่มตัวแปรออกแบบทั้งหมด (f'_c, f_y, b, h, ขนาดของเหล็กเสริมและปริมาณเหล็กเสริมทั้ง 2 ตำแหน่ง) โดยใช้สมการที่ 1 จากนั้นคำนวณกำลังรับน้ำหนักและราคากับผึ้งงานทุกตัว

2) ตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบกับผึ้งงานทุกตัว ถ้าผ่านเงื่อนไขให้ต่อขั้นตอนที่ 3 แต่ถ้าไม่ผ่านให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 1

3) คำนวณราคาให้กับตัวผึ้ง กำหนดผึ้งให้กลายเป็นผึ้งงานแล้วเก็บผึ้งไว้ในรังเพื่อรอให้ครบฝูงก่อนออกหาอาหาร

4) ตรวจสอบจำนวนของผึ้งงานภายในรัง ถ้าจำนวนผึ้งมีครบตามที่กำหนดให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ยังไม่ครบให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 1

5) คำนวณค่าโอกาสการถูกเลือกจากผึ้งสำรวจโดยใช้สมการที่ 3 ให้กับผึ้งงานทุกตัว

6) สร้างแหล่งอาหารใหม่โดยใช้สมการที่ 2

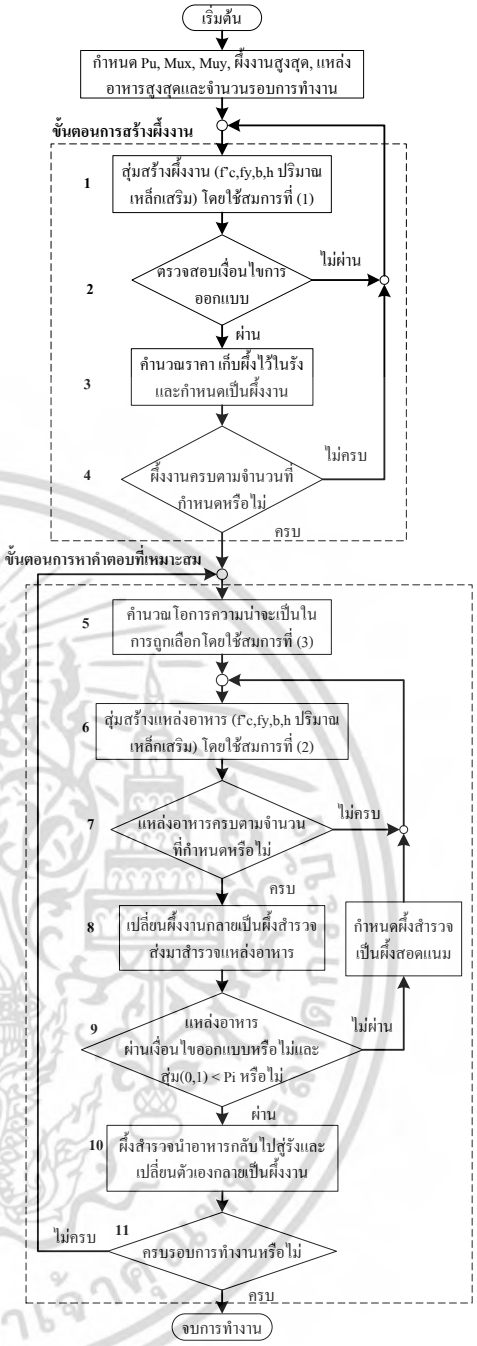
7) ตรวจสอบแหล่งอาหารมีจำนวนครบตามที่กำหนดหรือไม่ ถ้าครบแล้วให้ทำต่อขั้นตอนที่ 8 แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 6

8) เปลี่ยนผึ้งงานให้กลายเป็นผึ้งสอดแนมเพื่อสำรวจแหล่งอาหารใหม่

9) ผึ้งสำรวจตรวจสอบแหล่งอาหารด้วยการสุ่มค่าระหว่าง (0,1) เปรียบเทียบกับค่า Pi ของผึ้งงาน ตรวจสอบเงื่อนไขออกแบบและตรวจสอบราคา ถ้าค่าสุ่มน้อยกว่าค่า Pi และผ่านเงื่อนไขออกแบบและมีราคาประหยัดกว่าผึ้งงานที่ถูกเปรียบเทียบให้ทำต่อขั้นที่ 10 แต่ถ้าไม่ผ่านเงื่อนใดเลยให้เปลี่ยนผึ้งสำรวจกลายเป็นผึ้งสอดแนมแล้วทำต่อขั้นตอนที่ 6

10) ผึ้งสำรวจนำอาหารกลับมาที่รังแทนที่ผึ้งงานที่ถูกเลือกและเปลี่ยนตัวเองกลายเป็นผึ้งงาน

11) ตรวจสอบจำนวนรอบการทำงาน ถ้าครบจำนวนรอบแล้วให้หยุดการทำงานทันที แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำต่อขั้นตอนที่ 6



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

3.4 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่เลือกใช้มาจากงานวิจัย [7] แสดงในตารางที่ 3 จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยจะเลือกตัวอย่างที่ 1 ทดสอบปรับค่าพารามิเตอร์ให้กับอัลกอริทึมซึ่งได้แก่การกำหนดจำนวนรอบ 100 200 และ 300 รอบ การกำหนดจำนวนผึ้งงาน 30 50 และ 70 ตัว และการกำหนดแหล่งอาหาร 30 50 และ 70 แหล่ง หลังจากนั้น เลือกใช้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบทุกตัวอย่างจำนวน 10 ครั้ง และกำหนดใช้สถิติ t-test ทดสอบวัดความต่างของราคาเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างกับประชากรที่มีราคาต่ำสุดเช่นเดียวกับงานวิจัยของ [7]

ตารางที่ 3 ตัวอย่างทดสอบ [7]

ตัวอย่างทดสอบ	P_u (กก.)	M_{ux} (กก-ม.)	M_{uy} (กก-ม.)	ระยะหุ้ม (ซม.)
1	95,000	9,500	6,500	3.5
2	125,000	10,000	4,000	5

4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ผลการทดสอบเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกำหนดใช้จำนวนรอบที่มากขึ้นจะทำให้ได้คำตอบที่เหมาะสมแม่นยำขึ้น จึงทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้รอบการทำงาน 300 รอบ นอกจากนี้ การเลือกผึ้งงาน 50 ตัว ยังได้คำตอบที่เหมาะสมในทุกๆแหล่งอาหาร และการเลือกใช้จำนวนแหล่งอาหารเท่ากับ 50 แหล่ง มีค่าเฉลี่ยที่ดีเท่ากับ 70 แหล่ง แต่ใช้เวลาน้อยกว่าที่ 300 รอบ

ตารางที่ 4 ผลทดสอบการปรับจำนวนผึ้งงาน แหล่งอาหาร และจำนวนรอบ

รอบ	100 รอบ						200 รอบ						300 รอบ					
อาหาร	30		50		70		30		50		70		30		50		70	
ผึ้งงาน	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)	ราคา (บ./ม.)	เวลา (วินาที)
30	2,374	0.52	2,207	0.51	2,430	0.51	2,071	0.96	2,195	0.95	2,356	0.97	2,076	1.47	**2,013**	1.5	**2,013**	1.53
50	2,164	0.69	2,201	0.69	2,482	0.74	2,076	1.3	**2,013**	1.35	2,059	1.35	**2,013**	1.91	**2,013**	1.98	**2,013**	2.04
70	2,076	0.78	2,079	0.82	2,076	0.81	**2,013**	1.61	**2,013**	1.6	**2,013**	1.66	**2,013**	2.27	**2,013**	2.4	**2,013**	2.45
Min	2,076	0.52	2,079	0.51	2,076	0.51	2,013	0.96	2,013	0.95	2,013	0.97	2013	1.47	2013	1.5	2013	1.53
Max	2,374	0.78	2,207	0.82	2,482	0.81	2,076	1.61	2,195	1.6	2,356	1.66	2076	2.27	2013	2.4	2013	2.45
Average	2,204	0.66	2,162	0.67	2,329	0.69	2,053	1.29	2,073	1.30	2,142	1.33	2034	1.88	**2013**	1.96	**2013**	2.01

หมายเหตุ : บ./ม. = บาท/เมตร

ผลการทดสอบกับตัวอย่างออกแบบในตารางที่ 3 เมื่อการกำหนดใช้จำนวนผึ้งงาน 50 ตัว จำนวนแหล่งอาหาร 50 แหล่งและจำนวนรอบการทำงาน 300 รอบ ได้ผลการทดสอบทางสถิติตัวอย่างละ 10 ครั้ง ตามตารางที่ 5 ซึ่งคำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1 คือ ราคา 2,013 บาท/ม. และตัวอย่างที่ 2 คือราคา 1,854 บาท/ม. นอกจากนี้ ผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้ t-test ยอมรับสมมติฐาน H0 ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ทุกตัวอย่าง แสดงว่า ผลการทดสอบมีคำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยมาก

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติตัวอย่างละ 10 ครั้ง

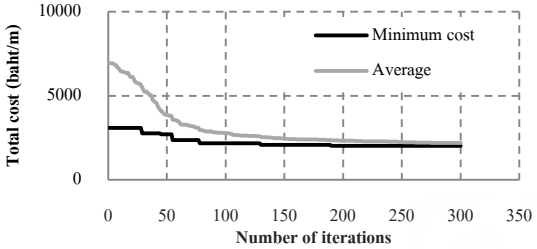
การทดสอบทางสถิติ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
ค่าเฉลี่ย	**2,025**	**1,860**
ค่าต่ำสุด	**2,013**	**1,854**
ค่าสูงสุด	2,076	1,880
ค่าความแปรปรวน	25.536	10.8914
ฐานนิยม	2,013	1,854
ค่าวิกฤติ	**2.82**	**2.82**
T-test	**1.50**	**1.80**
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	ยอมรับ H0	ยอมรับ H0

จากการทดสอบกับตัวอย่างออกแบบในตารางที่ 3 ด้วยการกำหนดใช้จำนวนผึ้งงาน 50 ตัว จำนวนแหล่งอาหาร 50 แหล่งและจำนวนรอบการทำงาน 300 รอบ มีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมดังรูปที่ 3 (ก-ข) ซึ่งเห็นได้ว่า เส้นกราฟค่าเฉลี่ยมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหายจนใกล้ถึงจุดที่พบคำตอบที่เหมาะสมจึงเปลี่ยนเป็นเส้นตรง สำหรับเส้นกราฟคำตอบที่ดีที่สุดมีลักษณะการลู่เข้าสู่ค่าต่ำสุดแบบขั้นบันไดเนื่องจากในบางรอบฝูงผึ้งไม่สามารถหาแหล่งอาหารที่ดีกว่าแหล่งอาหารเดิมได้จึงทำให้กราฟเป็นเส้นตรงในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่เมื่อถึงจุดที่พบแหล่งอาหารที่ดีกว่า กราฟจึงมีลักษณะตกแบบขั้นบันได

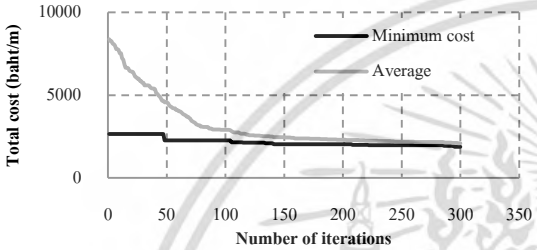
ผลการออกแบบที่ดีที่สุดในตารางที่ 6 เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา [7] แสดงให้เห็นว่า วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สามารถประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางได้โดยที่คำตอบที่เหมาะสมของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์เหมือนกับอัลกอริทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองการหล่อออบเหนียวแต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของเวลาทำงานพบว่า วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์เร็วกว่าอัลกอริทึมจำลองการหล่อออบเหนียว (SA) ประมาณ 17 วินาที



ก) รูปแบบการลู่เข้าหาคำตอบของตัวอย่างที่ 1



ข) รูปแบบการลู่เข้าหาคำตอบของตัวอย่างที่ 2

รูปที่ 3 รูปแบบการลู่เข้าคำตอบที่เหมาะสมของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบที่ดีที่สุดของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์และอัลกอริทึมจำลองการหล่อออบเหนียว

ตัวอย่างที่	1		2	
อัลกอริทึม	SA[7]	ABC	SA[7]	ABC
f'_c (กก./ซม.^{2})	320	320	320	320
f_y (กก./ซม.^{2})	4,000	4,000	4,000	4000
b x h (ซม.)	40 x 50	40 x 50	35 x 50	35 x 50
เหล็กตำแหน่งที่ 1	6 – DB16	6-DB16	6 – DB16	6-DB16
เหล็กตำแหน่งที่ 2	4 – DB16	4- DB16	6 – DB12	6-DB12
เหล็กปลอก	RB6@0.25	RB6@0.25	RB6@0.25	RB6@0.25
เวลา (วินาที)	19	2.02	19	1.96
ราคา(บาท/ม.)	2,013	2,013	1,854	1,854

5. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดสอบสำหรับการวิจัยครั้งนี้พบว่า วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สามารถประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางได้ ด้วยการกำหนดใช้จำนวนผึ้งงาน 50 ตัวและแหล่งอาหาร 50 แหล่งที่จำนวนรอบการทำงาน 300 รอบ นอกจากนี้ ยังมีความเร็วมากกว่าอัลกอริทึมจำลองการหล่อออบเหนียวทั้งสองตัวอย่าง

สำหรับข้อเสนอแนะการต่อยอดงานวิจัย ควรมีการศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์สำหรับออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหลากหลายรูปแบบมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อด้อยของวิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] D. Karaboga, “An idea based on honey bee swarm for numerical optimization,” Turkey: Technical Report-TR06; 2005.

[2] D. Karaboga and B. Basturk, “Artificial bee colony optimization algorithm for solving constrained optimization problems LNCS,” Advances in soft computing-foundations of fuzzy logic and soft computing, vol.4529, pp. 789–798, 2007.

[3] D. Karaboga and B. Basturk, “On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm,” Applied soft computing, Vol. 8, pp. 687–697, 2007.

[4] D. Karaboga and B. Akay, “A comparative study of artificial bee colony algorithm,” Applied mathematics and computation, vol. 214, pp. 108–132, 2009.

[5] Engineering institute of thailand, Standard of reinforced concrete building, strength method (E.I.T. 1008-38), 1997.

[6] Committee of construction price, Labor account/operation for estimate and calculate price (revised edition) year 2014, Bangkok in Thailand, 2014.

[7] A. Tapown, A. Lamom, J. wongpa 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้